



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado

Facultad de Ciencias Físicas

Unidad de Posgrado

Simulación de transporte de sedimentos en la bahía

Ferrol, Chimbote

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Ingeniería
Hidráulica con mención en Hidráulica Computacional

AUTOR

Carmela Cristhy RAMOS ORLANDINO

ASESOR

Bernardino SALVADOR ROJAS

Lima, Perú

2017



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ramos, C. (2017). *Simulación de transporte de sedimentos en la bahía Ferrol, Chimbote*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Física, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

1031



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAGÍSTER EN INGENIERIA HIDRÁULICA CON MENCIÓN EN HIDRAULICA
COMPUTACIONAL

26/15/152
A los veintiocho días del mes de junio del año dos mil diecisiete, siendo las nueve y treinta minutos de la mañana, se reunió el Jurado Examinador, en el auditorio 304 de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, presidido por el señor Msc. Ing. Douglas Sarango Julca como presidente, y con la asistencia de los siguientes miembros del Jurado Examinador:

Msc. Ing. Douglas Sarango Julca	(Presidente)
Dr. Aristides Ramón Serruto Colque	(Miembro integrante)
Dr. Kobi Alberto Mosquera Velásquez	(Miembro integrante)
Mg. Félix Arturo Campusano Baltazar	(Miembro integrante)
Dr. Felipe Américo Reyes Navarro	(Suplente)
Msc. Ing. Bernardino Salvador Rojas	(Asesor)

Para la sustentación oral y pública del trabajo de Tesis para optar el Grado Académico de Magíster en Ingeniería Hidráulica con mención en Hidráulica Computacional, de la bachiller Carmela Cristhy Ramos Orlandino con código N° 06137007.

Después de darse lectura al expediente de Grado en el que consta haberse cumplido con todas las disposiciones reglamentarias, los señores Miembros del Jurado Examinador, atendieron a la exposición de la Tesis titulada:

"Simulación de Transporte de Sedimentos en la Bahía Ferrol, Chimbote"

Y formuladas las preguntas, éstas fueron absueltas por el graduando.

Acto seguido, en privado, el Jurado Examinador procedió a la calificación. El Presidente determinó el promedio de la calificación, obteniendo como resultado de:

Muy Bueno (17) Diecisiete

A continuación el Presidente del Jurado Examinador recomienda que la Facultad de Ciencias Físicas proponga que se le otorgue el Grado Académico de Magíster en Ingeniería Hidráulica con mención en Hidráulica Computacional, a la bachiller Carmela Cristhy Ramos Orlandino.

Siendo las 11 con 30 y 00 minutos, se levantó la sesión; recibiendo la graduando las felicitaciones de los señores Miembros del Jurado Examinador y público asistente.

Los Miembros del Jurado Examinador suscriben el Acta de sustentación de tesis en Lima, a los veintiocho días del mes de junio del año dos mil diecisiete.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a las personas que han formado parte de mi vida personal y profesional, gracias por sus enseñanzas, amistad, paciencia, apoyo y comprensión en todas las actividades que me he trazado en mi vida, ya que la presente tesis no hubiera sido posible sin ustedes (familia y amigos), así mismo, agradecer a Dios por bendecirme con una familia hermosa que son el motivo de mi vida.

Agradecer, a mi asesor MSc. Salvador Rojas Bernardino, el mismo que con su experiencia, paciencia y visión crítica me ayudó a mejorar la tesis.

También me gustaría agradecer a mis profesores de la maestría de Ingeniería Hidráulica, ya que, con sus enseñanzas, cada uno ha aportado en mi formación académica para hacerme la persona profesional que soy.

Al profesor Salvador Zuta Rubio por enseñarme a querer este mundo de la oceanografía.

De igual manera agradecer a mi amigo de estudios y trabajo, Emanuel Guzmán Zorrilla, que, con su vocación de docencia, y consejos me han ayudado a ser un mejor profesional e investigador.

Y por último y no menos importante a mis padres, hermanas(o) y sobrinos, quienes me han visto crecer poco a poco hasta ser la persona que soy hoy.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a la persona más importante de mi vida, a la que con solo una sonrisa me da detonantes de felicidad, que me inspira a seguir esforzándome y a dar lo mejor de mí en cada cosa que empiezo, a ti hijita linda “Astrid Fernández Ramos”, te dedico esta tesis como reflejo de todas las cosas que puedes hacer en las personas que te rodean. Gracias por enseñarme a ser mejor cada día.

También dedico la tesis a mi compañero de vida Alex Fernández por sembrar paciencia donde a veces no la hay, y por entenderme en mis locuras académicas y profesionales, mis amanecidas estudiando, leyendo o trabajando. ¡Gracias y que siga creciendo más paciencia!

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I

- Figura 1.1.- Evidencia de erosión en la zona norte de la bahía Ferrol- Hotel de Turistas (a) Fotografía aérea 1979 (b) Imagen Google Earth 2003. Fuente: DHN, 20083
- Figura 1.2.- Evidencia de erosión en la zona norte de la bahía Ferrol- Hotel de Turistas (a) Foto antigua del hotel de turistas en Ferrol (b) Enrocado frente al hotel de Turistas. Fuente: DHN, 20084
- Figura 1.3.- Sedimentación en la zona centro de la bahía Ferrol. (a) Año 1979, (b) Año 2000 y (c) Año 2016. Fuente: DHN, 2008.....5
- Figura 1.4.- Diagrama de flujo de la modelación. Fuente: Elaboración propia9

Capítulo II

- Figura 2.1.- Características de una ola. (Fuente: Macdonel et al. 1999).11
- Figura 2.2.- Acción de un viento constante sobre una zona determinada del mar. Fuente: Adaptada de Fernandez, 200612
- Figura 2.3.- Descomposición del transporte de sedimentos. Fuente: Elaboración propia14
- Figura 2.4.- Esquematación de la línea de costa. Fuente: Elaboración propia.....17
- Figura 2.5.- Vista transversal de la zona de playa. Fuente: Hanson & Kraus, 1989.....17
- Figura 2.6.- Vista de perfil del funcionamiento del modelo. Fuente: Hanson & Kraus, 1989.....19
- Figura 2.7.- Vista de planta del funcionamiento del modelo. Fuente: Hanson & Kraus, 1989.....20
- Figura 2.8.- Variación del perfil costero al incluir un espigón. Fuente: Elaboración propia20
- Figura 2.9.- Variación del perfil costero al incluir un rompeolas. Fuente: Elaboración propia.....21

Capítulo III

- Figura 3.1.- Área de estudio. Fuente: Google Earth.....23
- Figura 3.2.- Geomorfología de la bahía Ferrol. (a)Zona Norte, (b)Zona Centro y (c)Zona Sur. Fuente: Google Earth25
- Figura 3.3.- Configuración batimétrica en la bahía El Ferrol. Fuente: DHN, 2008.....26

Figura 3.4.- Sondajes de batimetría de la DHN (a) En aguas profundas (b) En aguas poco profundas. Fuente: Elaboración propia	27
Figura 3.5.- Ubicación del punto de extracción de olas en aguas profundas. Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 3.6.- Serie de tiempo de altura, dirección y periodo en aguas profundas. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 3.7.- Rosa de dirección de olas (a) Altura de olas [m] y (b) Periodo de olas [s]. Fuente: Elaboración propia	31
Figura 3.8.- Ubicación de la estación de medición de olas. Fuente: DHN, 2008.....	32
Figura 3.9.- Alturas de olas medidas en la bahía Ferrol – Chimbote (marzo – junio 2007). (a) Serie de tiempo. (b) Histograma de altura. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 3.10.- Tamaño de partículas de sedimento superficial (<i>D50</i> y <i>D90</i>). Fuente: DHN, 2008.....	34
Figura 3.11.- Variación de la línea de costa (a) Zona norte de la bahía Ferrol (b) Detalle. Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 3.12.- Variación de la línea de costa (a) Zona centro de la bahía Ferrol (b) Detalle. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 3.13.- Variación de la línea de costa (a) Zona sur de la bahía Ferrol (b) Detalle. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 3.14.- Puntos de control definidos en la bahía Ferrol. Fuente: Elaboración propia	39

Capítulo IV

Figura 4.1.- Definición de grillas del modelo DELFT3D-WAVE. Fuente adaptado de DELTARES, 2014.....	44
Figura 4.2.- Esquema de la frecuencia en cada cuadrante. Fuente: Elaboración propia	48
Figura 4.3.- Esquema de grillado usado por el modelo DELFT3D WAVE. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 4.4.- Condiciones de frontera del modelo. Fuente: Elaboración propia	51
Figura 4.5.- Definición del ángulo de la ola modelo del modelo. Fuente: Hanson & Kraus, 1989.....	52

Figura 4.6.- Condiciones iniciales del modelo implementado. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 4.7.- Condiciones de frontera del modelo implementado. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 4.8.- Grilla empleada de diferencias finitas escalonada. Fuente: Elaboración propia	54
Figura 4.9.- Esquema del cálculo de transporte. Fuente: Elaboración propia	57
Figura 4.10.- Esquema del cálculo de la distancia “y” que representa erosión o sedimentación. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 4.11.- Esquema de un espigón perpendicular a costa. Fuente: Elaboración propia	59
Figura 4.12.- Evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Solución analítica. Fuente: Fredsoe & Deigaard, 1992	60
Figura 4.13.- Esquema de la evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Fuente: Fredsoe & Deigaard, 1992.....	61
Figura 4.14.- Evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 4.15.- Evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Fuente: Elaboración propia, elaborada de la Tabla 4.1	63
Figura 4.16.- Correlación de los resultados del modelo y la solución analítica para diferentes tiempos. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 4.17.- Esquema de un espigón paralelo a costa. Fuente: Elaboración propia	65
Figura 4.18.- Evolución del perfil costero con un rompeolas paralelo a costa. Solución analítica. Fuente: Hanson & Kraus, 1989.....	66
Figura 4.19.- Esquema de la evolución del perfil costero con un rompeolas paralelo a costa. Fuente: Hanson & Kraus, 1989.....	66
Figura 4.20.- Esquema de las alturas y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia	67
Figura 4.21.- Evolución del perfil costero con un rompeolas paralelo a costa. Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 4.22.- Evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Caso 02. Fuente: Elaboración propia	68
Figura 4.23.- Correlación entre los sedimentos del modelo y la solución analítica. Fuente: Elaboración propia.....	69

Figura 4.24.- Evolución del perfil costero para una playa recta y descarga de sedimentos. Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 4.25.- Esquema de la evolución del perfil costero debido a una descarga de sedimentos en costa. Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 4.26.- Evolución del perfil costero con una descarga de sedimentos en costa. Modelo desarrollado. Fuente: Elaboración propia	71

Capítulo V

Figura 5.1.- Interpolación de la batimétrica a la grilla de cálculo. (a) Malla Coarse y (b) Malla Fine. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 5.2.- Grilla de cálculo para la modelación de olas. Fuente: Elaboración propia	74
Figura 5.3.- Detalle de la malla fine. Fuente: Elaboración propia.....	75
Figura 5.4.- Probabilidad acumulada de la altura de ola en (m). Fuente: Elaboración propia	76
Figura 5.5.- Relación de variables altura, periodo y dirección. Fuente: Elaboración propia	77
Figura 5.6.- Estaciones de puntos de control definidos en la bahía. Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 5.7.- Modelación de olas en condiciones predominantes. $H_s=1.95\text{m}$, $\text{Dir}=220^\circ$ y $T_p=14\text{s}$. Fuente: Elaboración propia.....	81
Figura 5.8.- Modelación de olas en condiciones de braveza de mar de dirección suroeste. $H_s=4.00\text{m}$, $\text{Dir}=217.5^\circ$ y $T_p=14.3\text{s}$. Fuente: Elaboración propia	82
Figura 5.9.- Modelación de olas en condiciones de braveza de mar de dirección noroeste. $H_s=1.80\text{m}$, $\text{Dir}=293^\circ$ y $T_p=22\text{s}$. Fuente: Elaboración propia	83
Figura 5.10.- Rosa de altura de olas en la bahía. Fuente: Elaboración propia	84
Figura 5.11.- Olas en el punto Ológrafo. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia.....	85
Figura 5.12.- Comparación de la serie de tiempo entre lo medido y modelado. Fuente: Elaboración propia.....	87

Figura 5.13.- Validación del modelo de olas con el ológrafo. Fuente: Elaboración propia	88
Figura 5.14.- Grilla de detalle empleada para el transporte. Fuente: Elaboración propia	90
Figura 5.15.- Variación de la línea de costa en la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01. Fuente: Elaboración propia	93
Figura 5.16.- Variación de la línea de costa en la zona norte de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 5.17.- Variación de la línea de costa en la zona centro de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 5.18.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 5.19.- Variación de la línea de costa en la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01. Fuente: Elaboración propia	97
Figura 5.20.- Variación de la línea de costa en la zona norte de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 02. Fuente: Elaboración propia.....	98
Figura 5.21.- Variación de la línea de costa en la zona centro de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 02. Fuente: Elaboración propia.....	98
Figura 5.22.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 02. Fuente: Elaboración propia.....	99
Figura 5.23.- Variación de la línea de costa en la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 03. Fuente: Elaboración propia	101
Figura 5.24.- Variación de la línea de costa en la zona norte de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 03. Fuente: Elaboración propia.....	102
Figura 5.25.- Variación de la línea de costa en la zona centro de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 03. Fuente: Elaboración propia.....	102
Figura 5.26.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 03. Fuente: Elaboración propia.....	103
Figura 5.27.- Puntos de aporte de sedimentos artificial (relleno artificial) en la bahía de Ferrol. Fuente: Elaboración propia	105
Figura 5.28.- Variación de la línea de costa en la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 04. Fuente: Elaboración propia	107
Figura 5.29.- Variación de la línea de costa en la zona norte de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 04. Fuente: Elaboración propia.....	108

Figura 5.30.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol- Chimbote, Escenario 04. Fuente: Elaboración propia.....	108
Figura 5.31.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol- Chimbote, Escenario 04. Fuente: Elaboración propia.....	109
Figura 5.32.- Ubicación de los puntos de control definidos en la línea base del modelo de variación de línea de costa. Fuente: Elaboración propia.....	111
Figura 5.33.- Evolución de la línea de costa en los puntos de control P(20), P(40), P(60), P(80), P(100), P(120), P(140) y P(158). Fuente: Elaboración propia	113
Figura 5.34.- Transporte de sedimentos anuales en los puntos de control P(20), P(40) y P(60) . Fuente: Elaboración propia	119
Figura 5.35.- Transporte de sedimentos anuales en los puntos de control P(80), P(100) y P(120). Fuente: Elaboración propia.....	120
Figura 5.36.- Transporte de sedimentos anuales en los puntos de control P(140) y P(158) . Fuente: Elaboración propia.....	121
Figura 5.37.- Representación del Transporte de sedimentos litoral para cada escenario (x1000) [m ³ /año]. Fuente: Elaboración propia	122

LISTA DE TABLAS

Capítulo III

Tabla 3.1.- Estadística de las olas para el punto 79.5°Oeste y 9.5° Sur.	30
Tabla 3.2.- Procesos de erosión y sedimentación.....	40
Tabla 3.3.- Carga de sedimentos aportados por el río Lacramarca.....	41

Capítulo IV

Tabla 4.1.- Calculo de la evolución del perfil costero en años entre lo analítico y lo modelado. Caso 01	62
Tabla 4.2.- Correlación entre lo analítico y observado por tiempos de simulación	63
Tabla 4.3.- Calculo de la evolución del perfil costero en años entre lo analítico y lo modelado. Caso 02	68

Capítulo V

Tabla 5.1.- Características de la grilla de cálculo empleadas en la modelación	72
Tabla 5.2.- Casos representativos de olas en aguas profundas.....	77
Tabla 5.3.- Ubicación de las estaciones de puntos de control definidos en la bahía.....	79
Tabla 5.4.- Estadística básica de altura de olas, entre lo medido y modelado.....	86
Tabla 5.5.- Flujo medio de energía en cada punto de control definido en la bahía	89
Tabla 5.6.- Tasa de variación (m/año) de la línea de costa medido y modelado.....	104
Tabla 5.7.- Coordenadas de los puntos de control definidos en la línea base del modelo de transporte de sedimentos.....	110
Tabla 5.8.- Transporte de sedimentos en los puntos de control para el escenario 01 (sin río)	115
Tabla 5.9.- Transporte de sedimentos en los puntos de control para el escenario 02 (con río).....	116
Tabla 5.10.- Transporte de sedimentos en los puntos de control para el escenario 03 (con aporte de río a 1km al sur)	117
Tabla 5.11.- Transporte de sedimentos en los puntos de control para el escenario 04 (con aporte de río y relleno en la zona norte)	118

INDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS.....	ix
INDICE	x
RESUMEN.....	xiv
CAPITULO I.- INTRODUCCION	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Problemática.....	1
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.2. Objetivos Específicos.....	6
1.4. Estructura de la tesis	7
CAPITULO II.- FUNDAMENTO TEORICO	10
2.1.- Olas 10	
2.1.1. Elementos de una ola	10
2.1.2. Clasificación de las olas	12
2.1.3. Transformación del oleaje en las proximidades de las costas.....	13
2.2.- Transporte de sedimentos en playas	13
2.2.1. Tipos de transporte de sedimentos	14
2.2.2. Formulaciones de transporte litoral.....	15
2.3. Evolución de la línea de costa	16
2.3.1. Demostración de la ecuación de continuidad del sedimento	18
2.4. Evolución del perfil costero por presencia de estructuras marinas	20
CAPITULO III.- AREA DE APLICACIÓN	22
3.1. Área de estudio.....	22

3.2. Geomorfología del área de estudio.....	24
3.3. Batimetría y perfil costero	27
3.4. Olas	28
3.4.1. Olas en Aguas Profundas.....	28
3.4.2. Olas en Aguas Poco Profundas	32
3.5. Granulometría de sedimentos	33
3.6. Procesos de erosión y sedimentación en la bahía.....	34
3.7. Sedimentos del río Lacramarca	41
3.7.1. Sedimentos en suspensión	41
3.7.2. Sedimentos en fondo.....	42
CAPITULO IV.- MODELACIÓN NUMÉRICA	44
4.1. Descripción del modelo de olas empleado.....	44
4.1.1. Ecuación de Balance de la densidad del espectro de olas	45
4.1.2. Ecuación de Balance de la densidad del espectro de olas de forma estacionaria.....	46
4.1.3. Esquema numérico de la ecuación de balance espectral estacionario	48
4.1.4. Condiciones de frontera.....	51
4.2.- Desarrollo del modelo de transporte de sedimentos.....	52
4.2.1.- Descripción del modelo de variación de línea de costa	52
4.2.2. Condiciones iniciales.....	53
4.2.3. Condiciones de frontera.....	53
4.2.4. Esquema de cálculo en el dominio	54
4.2.5. Obtención de la ecuación gobernante.....	54
4.2.6. Esquema numérico de la ecuación de variación de la línea de costa.....	56
4.2.7. Explicación del modelo de variación de línea de costa	57
4.2.8. Validación del modelo de transporte de sedimentos a casos teóricos	58
4.2.8.1. Caso 01: Espigón perpendicular a costa (teórico).	58
4.2.8.2. Caso 02: Rompeolas paralelo a costa	65

4.2.8.3. Caso 03: Influencia de una fuente de sedimentos en una playa recta	70
CAPITULO V.- RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	72
5.1. Clima marítimo de olas.....	72
5.1.1. Configuración del modelo	72
5.1.1.1. Grilla de cálculo.....	72
5.1.1.2. Casos a ser mostrados	75
5.1.1.3. Puntos de control de clima de olas.....	78
5.1.1.4. Flujo medio de energía	80
5.1.2. Resultados del clima marítimo	81
5.1.2.1. Distribución espacial.....	81
5.1.2.2. Clima de olas en los puntos de control.....	84
5.1.2.3. Validación de los resultados de olas	86
5.2. Modelación del transporte de sedimentos y variación de la línea de costa en la bahía El Ferrol	90
5.2.1. Configuración del modelo	90
5.2.1.1. Grilla de cálculo.....	90
5.2.1.2. Condiciones de frontera.....	91
5.2.1.3. Escenario de modelación	91
5.2.1.4. Resultados de la modelación de transporte.....	92
a. Escenario 01: Modelación sin considerar el aporte de sedimentos del río Lacramarca.....	92
b. Escenario 02: Modelación considerando el aporte de sedimentos del río Lacramarca cercano a la base naval de Chimbote (Ubicación de descarga hasta el 2009).....	96
c. Escenario 03: Modelación considerando el aporte de sedimentos del río Lacramarca a 1km al sur de la base naval de Chimbote (Ubicación de la descarga del río al 2016).....	99
d. Escenario 04: Modelación igual al escenario 03 y un relleno artificial en la zona norte de la bahía.	105

5.2.1.5. Puntos de control.....	110
5.3. Análisis y discusión	123
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	125
BIBLIOGRAFIA.....	128
ANEXO	130

RESUMEN

La Bahía Ferrol - Chimbote, ubicada en la parte Norte de las costas del Perú en el departamento de Ancash, en la actualidad, en cuanto a dinámica marina, viene siendo afectada por dos problemas principales. El primero de ellos es la contaminación de sus aguas y el segundo son los problemas de erosión y sedimentación de sus playas que afecta a toda la bahía

En el presente trabajo de tesis se ha abordado el problema de la erosión y sedimentación de la bahía El Ferrol, para lo cual se realizó la modelación numérica de la variación de línea de costa en la bahía Ferrol mediante el desarrollo de un modelo matemático basado en la ecuación de Pelnard-Considere (1956). El modelo numérico de variación de línea de costa fue desarrollado en lenguaje de programación fortran, bajo un esquema progresivo en el tiempo y centrado en el espacio y funciona en base a los resultados de olas provenientes del modelo DELFT3D-Wave. Para determinar las capacidades del modelo, se evaluaron tres casos teóricos que presentan una evolución conocida del perfil costero, con solución analítica, que nos va a permitir evaluar el grado de precisión del modelo desarrollado.

Como punto de partida para el estudio de la erosión y sedimentación, se realizó la determinación del clima marítimo en aguas costeras, para la cual se tuvo que propagar hasta la costa el oleaje en aguas profundas provenientes del reanálisis, desde 1979 a 2010. En la bahía, se han seleccionado puntos de control cercanos a costa, con la finalidad de que puedan emplearse como condición de frontera para el modelo de variación de línea de costa a desarrollarse. Así mismo, se seleccionó como punto de control la ubicación donde se tiene registros de mediciones de olas de marzo a junio 2007, información que permitirá validar el modelo de olas con mediciones medidas en campo.

Determinado el clima de olas en aguas costeras, se aplicó el modelo de línea de costa, tomando en consideración que la bahía presenta dos fronteras fijas en los extremos: Enrocado en el norte y el cerro Península en el sur. Los escenarios definidos en base a las características de la zona de estudio fueron 4, en el primero de ellos no se consideró el aporte de sedimentos del río Lacramarca; en el segundo escenario se modela la bahía considerando el aporte de sedimentos del río Lacramarca correspondiente a la ubicación de su desembocadura del año 2009; el tercer escenario considera que la descarga del río se realiza 1km al sur de la ubicación de su desembocadura del 2009 (condición al 2016); y el cuarto

escenario es similar al escenario 03, con adición de que se considera que se realiza un relleno artificial, como método de recuperación de playas, en la zona norte de la bahía.

Los escenarios 01 y 02 permitieron determinar la importancia de la descarga del río Lacramarca como aportante de sedimentos en la bahía. Asimismo, el escenario 03, permite determinar qué cambios se producirían en el transporte de sedimentos y variación de la línea de costa al mover la desembocadura del río Lacramarca 1km al sur de su posición inicial, que corresponden a las condiciones actuales. Por último, el escenario 04, permite determinar los cambios que se producirían si se realiza un relleno artificial en el norte de la bahía de Ferrol.

Finalmente se puede observar que el modelo tiene una buena representación de la variación de la línea de costa, siendo necesario investigar otros aportantes de sedimentos que puedan existir en la bahía que puedan mejorar la tendencia.

CAPITULO I.- INTRODUCCION

1.1. Generalidades

Uno de los principales problemas ambientales que se presenta en la actualidad en el litoral peruano y que se da de forma muy lenta y progresiva, es la erosión de las costas en zonas donde existe una alta actividad turística o industrial, así como el arenamiento de playas en zonas de interés portuario.

De esta manera, en el presente trabajo de tesis, se investigará los procesos de erosión y sedimentación que se vienen presentando en la bahía El Ferrol, en Chimbote. Para esto, empleará técnicas numéricas que permitan en primer lugar diagnosticar la dinámica del oleaje que permita estimar las tasas de transporte potencial de sedimentos y predecir la variación del perfil en un horizonte de pronóstico de largo plazo.

Como antecedentes de estudios donde se ha aplicado modelación numérica en la bahía Ferrol tenemos los realizados por DHN (2003), DHN (2010), Delft Hydraulics (1996), IMARPE (2002), Guzmán (2006 y 2014), los mismos que estudian la dinamica de corrientes y transporte de sedimentos en la bahia de Ferrol

Así mismo, la metodología para la obtención de las olas en aguas poco profundas ha sido obtenido de Camus, *et al.* (2011) y que fue aplicada en la bahía de Miraflores por Ramos (2014); la metodología de trabajo para estimar el transporte potencial de sedimentos y las variaciones de línea de costa fue tomado de Hanson & Kraus (1989).

1.2. Problemática

La bahía Ferrol a través de los años ha sufrido una serie de variaciones de la dinámica marina y, por tanto, del transporte de sedimentos producido principalmente por la interacción humana (industria y pesquería, construcción de estructuras) y de forma natural debido a la presencia del río Lacramarca y el aporte de sedimentos eólico.

En la bahía El Ferrol, a pesar de los serios problemas de erosión que se viene dando en la zona norte y el arenamiento en la zona centro de la bahía, aún no se ha podido tomar acciones para su recuperación, por lo que esta tesis podrá contribuir al estudio de la dinámica marina y transporte de sedimentos en la bahía.

La bahía Ferrol ha sufrido desde los años 1960 a la actualidad un proceso lento de erosión que se ha visto reflejado en la reducción del ancho de las playas ubicadas al norte de la bahía El Ferrol, adyacente al hotel de Turistas y plaza Grau. En la Figura 1.1 se observa, en 1979, que la zona frente a la plaza Grau presentaba una extensión de playa de aproximadamente 40m, mientras que, en la imagen de 2003 se observa que esa misma zona se encuentra actualmente enrocada, debido a la fuerte erosión que se evidencia en esa área.

Esta erosión obligó a las autoridades a proteger el perfil costero mediante un enrocado de más de 2 km de extensión ubicado en la zona norte de la bahía. Así mismo, observamos en la Figura 1.2(a) que el hotel de turistas contaba con una extensa playa, encontrándose actualmente enrocado como en la Figura 1.2(b).

Por otro lado, en la zona centro de la bahía (Figura 1.3), se presenta un proceso de sedimentación que trae consigo la reducción de la profundidad lo que afectan el libre tránsito de las embarcaciones que llegan a la zona (Base naval Chimbote), lo que obliga a que constantemente se realicen operaciones de dragado en dicho sector. Esto se puede observar en el hecho que la última estructura (ubicada al sur) presenta una extensión de 300m medida desde costa (año 1979), mientras que en el año 2000 se observa que la estructura presenta una distancia desde costa de 180m, distancia que en la actualidad se ha visto reducido a 150m desde costa.



(a)



(b)

Figura 1.1.- Evidencia de erosión en la zona norte de la bahía Ferrol- Hotel de Turistas (a) Fotografía aérea 1979 (b) Imagen Google Earth 2003. Fuente: DHN, 2008

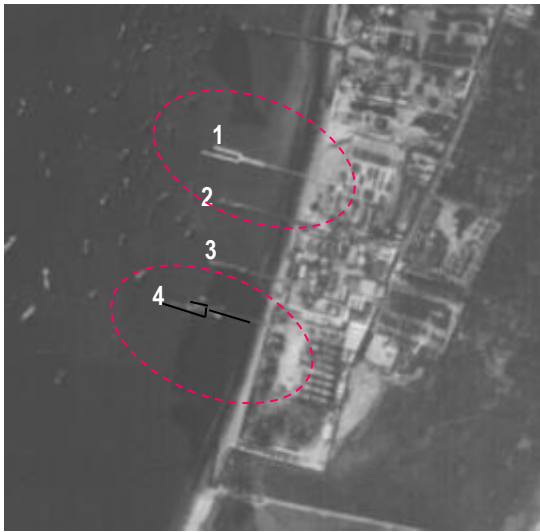


(a)

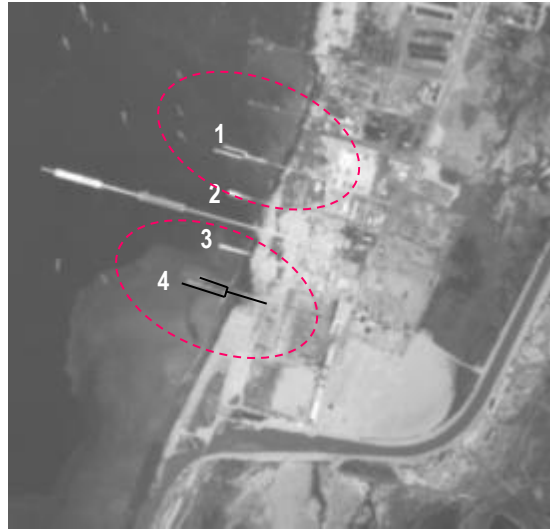


(b)

Figura 1.2.- Evidencia de erosión en la zona norte de la bahía Ferrol- Hotel de Turistas (a)
Foto antigua del hotel de turistas en Ferrol (b) Enrocado frente al hotel de Turistas. Fuente:
DHN, 2008



(a) Año 1979



(b) Año 2000



(c) Año 2016.

Figura 1.3.- Sedimentación en la zona centro de la bahía Ferrol. (a) Año 1979, (b) Año 2000 y (c) Año 2016. Fuente: DHN, 2008

1.3. Objetivos

Los objetivos de la presente tesis se describen a continuación

1.3.1. Objetivo General

- Estimar el transporte litoral potencial de sedimentos que influencia en la variación temporal y espacial de la línea de costa en la bahía El Ferrol, Chimbote; mediante el desarrollo de un modelo numérico computacional.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el clima de olas en los puntos predeterminados en la bahía de Ferrol, mediante la implementación del modelo de olas Delft3d-Wave, el cual sirva como forzante al modelo de variación de línea de costa.
- Comparar la validez de los resultados del modelo de olas con los datos medidos de un ológrafo en la bahía de Ferrol.
- Implementar un modelo numérico computacional de variación de línea de costa que permita analizar la tendencia de la línea de costa para casos teóricos con soluciones analíticas.
- Aplicar el modelo numérico de la variación de la línea de costa en la bahía El Ferrol para un horizonte de pronóstico de 20 años.
- Estimar la magnitud del transporte de sedimentos longitudinal en la bahía de Ferrol.

1.4. Estructura de la tesis

La estructura de la presente tesis se muestra de forma esquematizada en la Figura 1.4, en la que se muestra de forma general el proceso de modelación numérica a seguirse, que parte por la información de olas en aguas profundas, la propagación de olas desde aguas profundas hasta la costa, la determinación del clima de olas en aguas poco profundas y finalmente el cálculo del transporte de sedimentos potencial que influye en la variación temporal y espacial de la línea de costa.

A continuación, se describe de manera general cada una de las etapas de modelación a seguir en la presente tesis.

- a) Información de olas en aguas profundas: En esta etapa se emplea información del reanálisis de olas del NCEP-NOAA producto de la implementación del modelo WWATCH de 1979 a 2010 (30 años), donde se cuenta información de altura significativa, dirección y periodo de olas con una resolución temporal de cada 3hr y una resolución espacial de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Así mismo, esta información se muestra en el Capítulo III de la presente tesis.
- b) Propagación de olas de aguas profundas a poco profundas: De la información de olas del reanálisis del modelo WWATCH, se realiza la propagación de cada una de las condiciones de olas evaluadas en cada paso de tiempo, a través de mallas que contemplan desde aguas profundas a la zona de estudio en la bahía El Ferrol. Esta modelación se realiza con el modelo de olas Delft3d-wave. Así mismo, esta información se muestra en el Capítulo VI de la presente tesis.
- c) Clima de olas cercano a costa: Una vez que tenemos la propagación de olas en aguas poco profundas de forma espacial, procedemos a seleccionar algunos puntos de control dentro de la zona de estudio y validar el modelo de olas. Con esta información se elaboran rosas de dirección y alturas de olas, que permitan determinar cuál es la condición de olas más predominante, que pueda influir en el área de estudio. Esta información se muestra en el Capítulo V de la presente tesis y en el anexo.

Una vez validado la modelación de olas, se calcula el flujo medio de energía de olas cercano a costa para obtener su altura y dirección asociada, el cual pueda servir como

información de entrada al modelo de línea de costa; este proceso se realiza mediante un programa desarrollado en fortran para determinar la condición predominante; esta información se muestra en el Capítulo V de la presente tesis.

d) Validación del modelo desarrollado de transporte de sedimentos para casos teóricos:

En base a la teoría de Pelnard-Considere (1956), se elabora un programa de computo en lenguaje fortran para determinar la variación de la línea de costa en función al transporte litoral debido a las olas. Para esto se realizó la comparación entre diversas soluciones analíticas teóricas mostradas en bibliografías con los resultados del modelo desarrollado, bajo las mismas condiciones dinámicas. Esta información se muestra en el Capítulo IV de la presente tesis.

e) Modelación de variación de línea de costa y cálculo del transporte litoral de sedimentos en la bahía El Ferrol:

En función de las condiciones medias de las olas determinadas en la bahía El Ferrol, mediante la técnica del flujo medio de energía, se determina la variación de la línea de costa y se calcula la tasa de transporte litoral en la bahía El Ferrol, así mismo, se realiza la validación de la tasa de transporte de sedimentos. Esta información se muestra en el Capítulo V de la presente tesis.

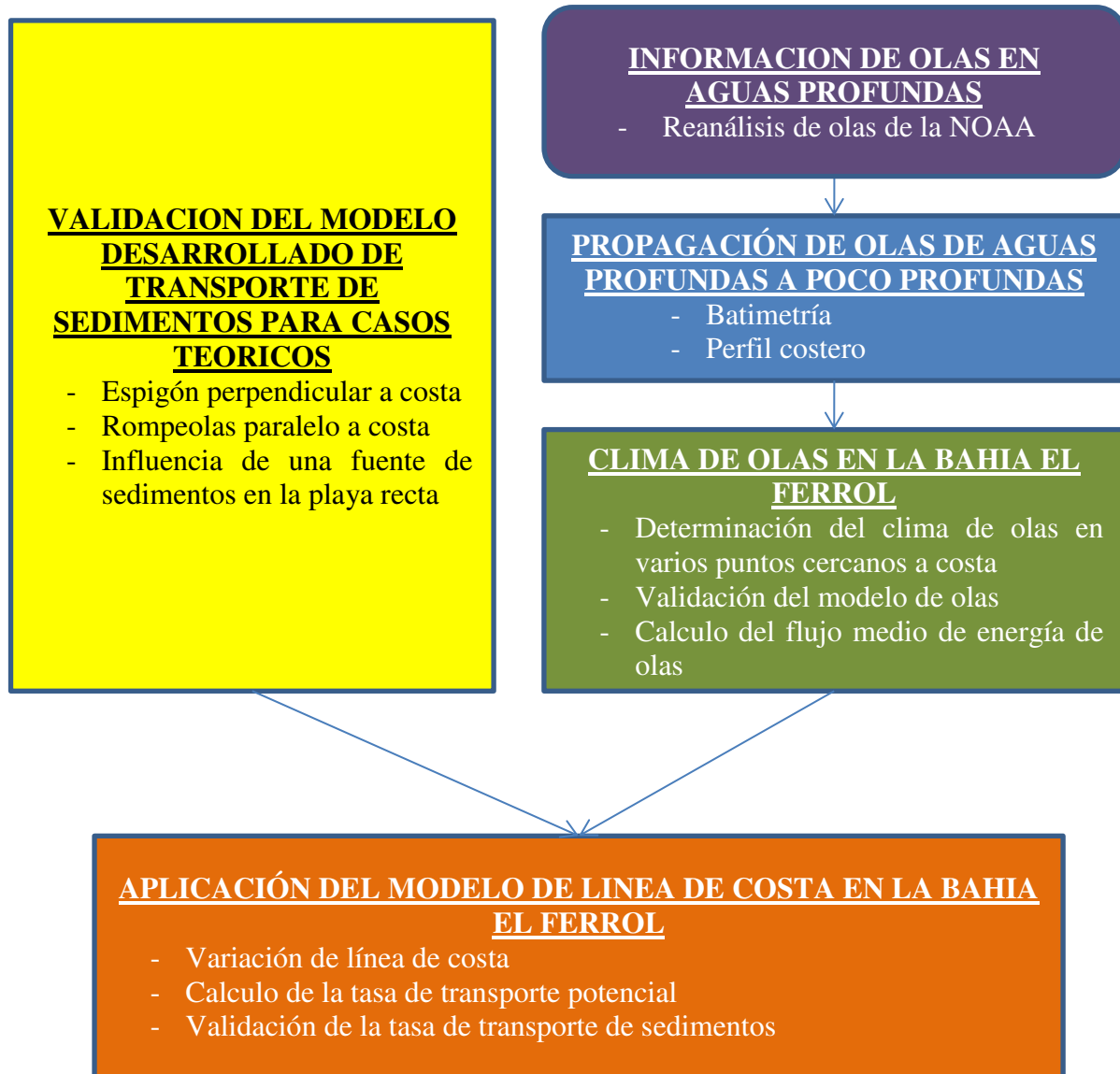


Figura 1.4.- Diagrama de flujo de la modelación. Fuente: Elaboración propia

CAPITULO II.- FUNDAMENTO TEORICO

2.1.- Olas

Según la RAE (2014), una ola es “Cada una de las elevaciones que se forma al perturbar la superficie de un líquido”. En el océano, estas perturbaciones están influenciadas por la acción del viento sobre la superficie del mar y presentan periodos característicos entre 5 y 22 segundos.

Las olas son una de las principales variables que influyen en el transporte de sedimentos, ya que son las olas las que ponen los sedimentos en suspensión y permiten que estos sean removidos y transportados a lo largo del litoral.

2.1.1. Elementos de una ola

Las olas se caracterizan por tener una Longitud (L) que es la distancia entre dos crestas consecutivas, la altura (H) que es la distancia vertical entre una cresta y un valle consecutivos, el Período (T), que es el tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivos por un mismo lugar, la Dirección (D), es el ángulo de aproximación de la ola con respecto a un sistema de referencia oceanográfico (Macdonel *et al.* 1999). Ver Figura 2.1.

Con los elementos de la ola, se definen otras variables, tales como:

- **Celeridad (C):** o velocidad de propagación, que resulta de la longitud entre dos crestas (L) dividido entre el Periodo (T). Fuente: (G.I.O.C. Dinamicas, 2000)

$$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad [m/s] \quad (2.1)$$

Donde:

- h : Profundidad (m)
- L : Longitud de la ola (m)
- T : Periodo (s)
- g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

- **Altura significativa de la ola (H_s).** - Es el promedio del tercio superior de todas las alturas de olas observadas (Macdonel *et al.* 1999).

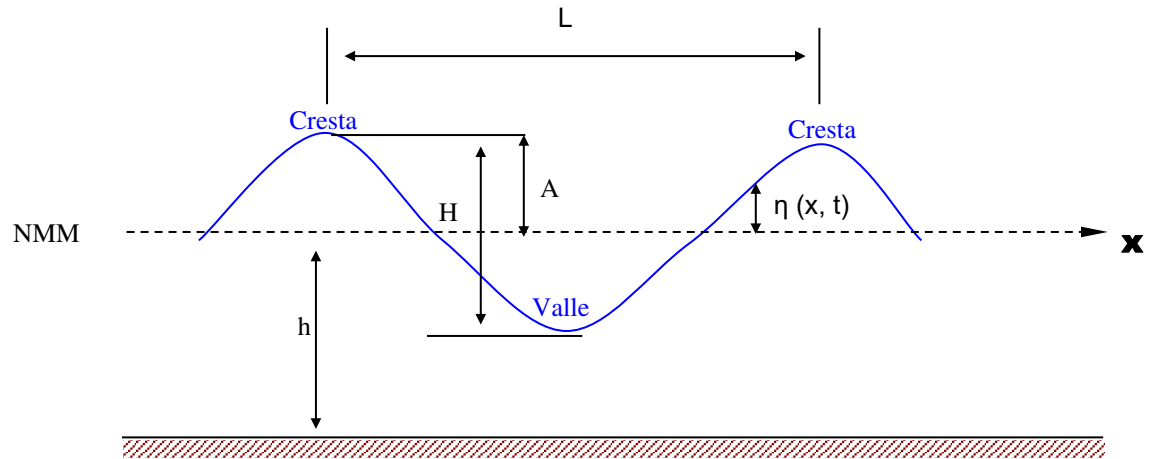


Figura 2.1.- Características de una ola. (Fuente: Macdonel et al. 1999).

- **Nivel Medio del Mar (NMM).**- Se define como el nivel de las aguas tranquilas durante un periodo determinado de tiempo (meses, años) de tal forma que los efectos provocados periódicamente por mareas y por otras causas frecuentes como las olas queden compensados (IOC/UNESCO, 2006).
- **Pendiente de la playa en la zona de rompiente (m).**- Es la distancia que existe entre la profundidad y la distancias horizontal en el límite máximo de la altura de ola.
- **Altura de ola en rompiente (H_b).** - Es el límite máximo de la altura de ola, a partir del cual esta se vuelve inestable y rompe, esta altura de ola en rompiente en aguas costeras está en función de la profundidad y la longitud de ola (USACE, 2002).
- **Periodo pico (T_p).**- Este término, está asociado al periodo que produce la mayor energía de la ola (USACE, 2002).

2.1.2. Clasificación de las olas

Las olas de acuerdo con su origen (Figura 2.2) se clasifican en:

- **Olas tipo Sea o de viento**

Es el oleaje que se forma y desarrolla bajo la acción directa y continua del viento, se caracterizan por tener altura, periodo y dirección de propagación aleatoria e independiente. Este tipo de oleaje, presenta generalmente formas puntiagudas, con periodos y longitudes de onda pequeños y no presentan una dirección definida, por lo que se trata de un oleaje muy irregular (Macdonel *et al.* 1999). Este tipo de olas no son materia de estudio en la presente tesis.

- **Olas tipo Swell o mar de fondo**

Son olas que dejaron de estar bajo la influencia del viento y por lo tanto abandona el área de generación, desplazándose decenas de kilómetros desde su zona de origen y siguiendo la misma dirección del viento que las generó. Este tipo de olas SWELL, se propagan desde aguas profundas a aguas poco profundas, presentando crestas redondeados, con periodos y longitudes de ola grandes, dando lugar a un aspecto ordenado. (Macdonel *et al.* 1999).y (Martinez, 2013).

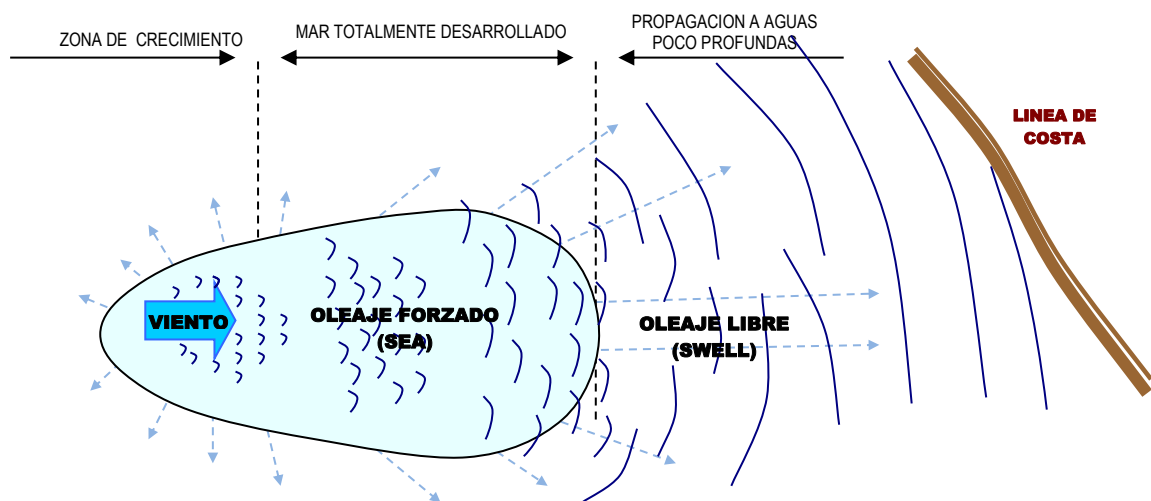


Figura 2.2.- Acción de un viento constante sobre una zona determinada del mar. Fuente: Adaptada de Fernandez(2006)

2.1.3. Transformación del oleaje en las proximidades de las costas

a) Refracción

La refracción tiene lugar cuando un tren de olas encuentra un cambio de profundidad, en este caso una parte del frente de la ola viaja en aguas someras y, por tanto, con menor celeridad que el resto dando lugar a un cambio de dirección. Así mismo el frente de propagación de la ola al acercarse a playa, tiende a adaptarse a las curvas de fondo del mar.

b) Difracción

La difracción es la dispersión de la energía del oleaje debido a una barrera, permitiendo la aparición de pequeños sistemas de olas en aguas protegidas por un obstáculo. Cuando la ola pasa al otro lado de la barrera, el frente de olas adopta una forma circular, entrando en una zona de calma por detrás de la barrera, disminuyendo su altura en esa zona.

c) Reflexión

La reflexión se produce cuando la ola choca con un obstáculo vertical (barrera), la ola se refleja con muy poca pérdida de energía

d) Rotura del oleaje

El oleaje al acercarse a la costa se ve afectado por el fondo, lo que provoca un aumento del peralte y la disminución de la celeridad de la onda. En esta zona, la ola se ve afectada por el fondo, produciendo que la altura de ola crezca hasta desestabilizarse y deja de mantener la forma. La velocidad de la onda en la parte superior de la cresta supera la celeridad de la ola, las partículas escapan de la cresta, lanzándose hacia delante, produciéndose la rotura de la onda. Este chorro de agua lanzado desde la cresta de la ola penetra de nuevo en la base de la onda, atrapando aire en el túnel y provocando una gran turbulencia

2.2.- Transporte de sedimentos en playas

El transporte de sedimentos en playas está dado por el movimiento de suelos (sedimentos), el cual se mueve en el espacio y el tiempo de forma continua a causa del movimiento que se genera principalmente por olas, mareas, vientos, entre otros. De esta manera los modos de transporte son por saltación, rodamiento y por salto de sedimentos.

El movimiento del sedimento cercano a costa se puede estudiar en dos zonas, la más próxima a la costa “onshore” y la más alejada a costa o aguas profundas “offshore”, para fines de esta tesis nos centraremos en el movimiento de sedimentos cercano a costa, principalmente entre la zona de rompientes y el perfil de costa.

2.2.1. Tipos de transporte de sedimentos

El movimiento de los sedimentos debido al oleaje se clasifica en 2 tipos (Figura 2.3):

- Transporte longitudinal a costa o transporte litoral. - Es el transporte que se da a lo largo del perfil costero y es el responsable de los cambios en la línea de costa.
- Transporte transversal. - Es el transporte perpendicular a costa y es el responsable de los cambios del fondo del perfil de playa.

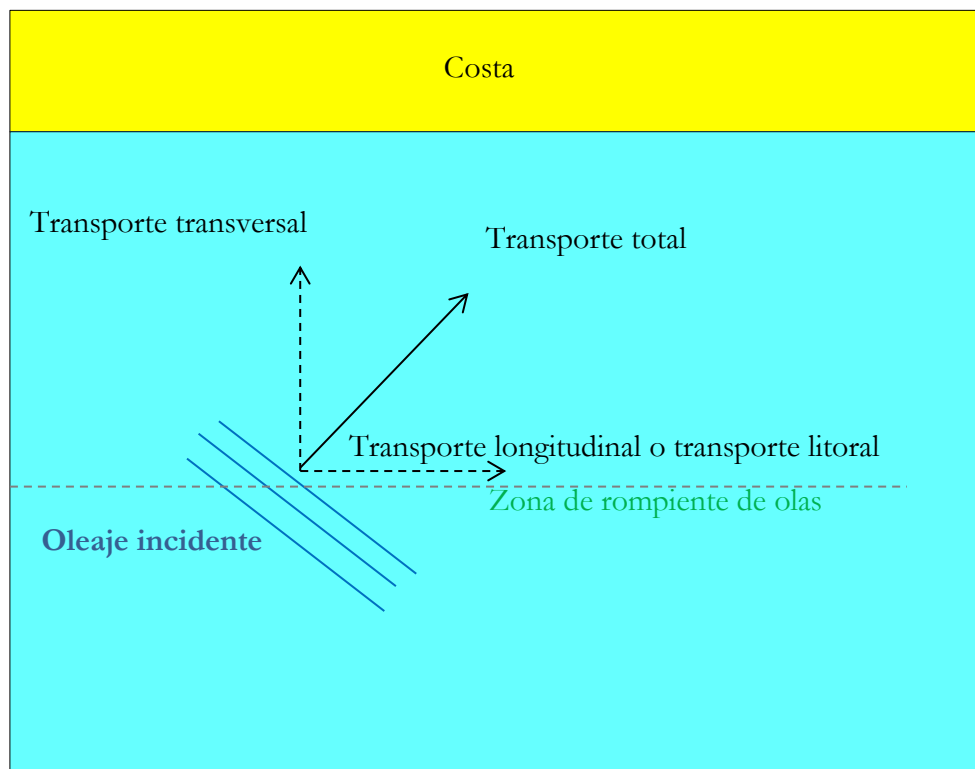


Figura 2.3.- Descomposición del transporte de sedimentos. Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Formulaciones de transporte litoral

El transporte litoral es el fenómeno mediante el cual el sedimento se desplaza en la zona costera, entre la costa y la zona de rompiente de olas, bajo la influencia del oleaje. Entre las formulaciones más conocidas tenemos:

Transporte longitudinal de CERC.- La formulación del Coastal Engineering Research Center (CERC) fue desarrollada por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos, es una de las fórmulas más comúnmente usados para calcular el transporte de sedimentos longitudinal (USACE, 2002).

$$Q = K_c H_{sb}^{5/2} \sin \alpha_b \quad \left[m^3 / \text{año} \right] \quad (2. 2)$$

Donde:

H_{sb} : Es la altura de ola significativa en rotura

α_b : Angulo de incidencia en rotura

K_c : 2.9×10^6

Una adaptación de la formulación de CERC, fue empleada en el modelo GENESIS, la cual fue modificada por Hanson & Kraus (1989), en la que se muestra la ecuación de transporte empleado en Genesis para el transporte de sedimentos a lo largo de la costa. (Longshore)

$$Q = (H^2 \cdot C_g)_b \left(A_1 \cdot \sin 2\alpha_{bs} + A_2 \cdot \cos \alpha_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_b \quad \left[m^3 / \text{año} \right] \quad (2. 3)$$

y

$$A_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) (1.416)^{\frac{5}{2}}} \quad (2. 4)$$

$$A_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) \tan \beta (1.416)^{\frac{7}{2}}} \quad (2. 5)$$

Dónde:

b : En rompiente

α_{bs} : Angulo de rompiente de olas con respecto a la línea de costa

H : Altura de ola en rompiente $[m]$

C_g : Celeridad de grupo $C_g = \sqrt{gd}$ (para aguas poco profundas) $[m/s]$.

- ρ_s : Densidad de la arena (2650 kg/m³)
- ρ : Densidad del agua (1030 kg/m³)
- p : Porosidad de la arena en fondo (0.4)
- $\tan\beta$: Promedio pendiente de fondo con respecto a la línea de costa.
- K_1 y K_2 : Parámetros de calibración, $K_1 = [0.77 - 0.58]$ y $K_2 = [0.50 - 1.00]K_1$

Transporte longitudinal de Kamphuis.- Fue desarrollado en base a una formula empírica la cual incluye la pendiente de playa, el periodo de ola y el grano de sedimentos basados en experimentos de laboratorio. (Kamphuis, 2002).

$$Q = KH_{sb}^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \text{sen}(2\alpha_b)^{0.6} \quad \left[m^3 / \text{año} \right] \quad (2.6)$$

Donde:

- T_p : Periodo pico
- m : Pendiente de la playa en la zona de rompientes
- D_{50} : Diámetro nominal 50 del material en la playa
- K : 6.4×10^4

2.3. Evolución de la línea de costa

La evolución del perfil costero es uno de los temas más importantes en la ingeniería de costas. El primer modelo de línea de costa fue desarrollado por Pelnard-Considere (1956). Este modelo, considera la posición de un punto de la línea de costa en términos de coordenadas “x-y”, siendo “x” la distancia a lo largo de la costa y “y” la distancia perpendicular a la costa. Ver Figura 2.4.

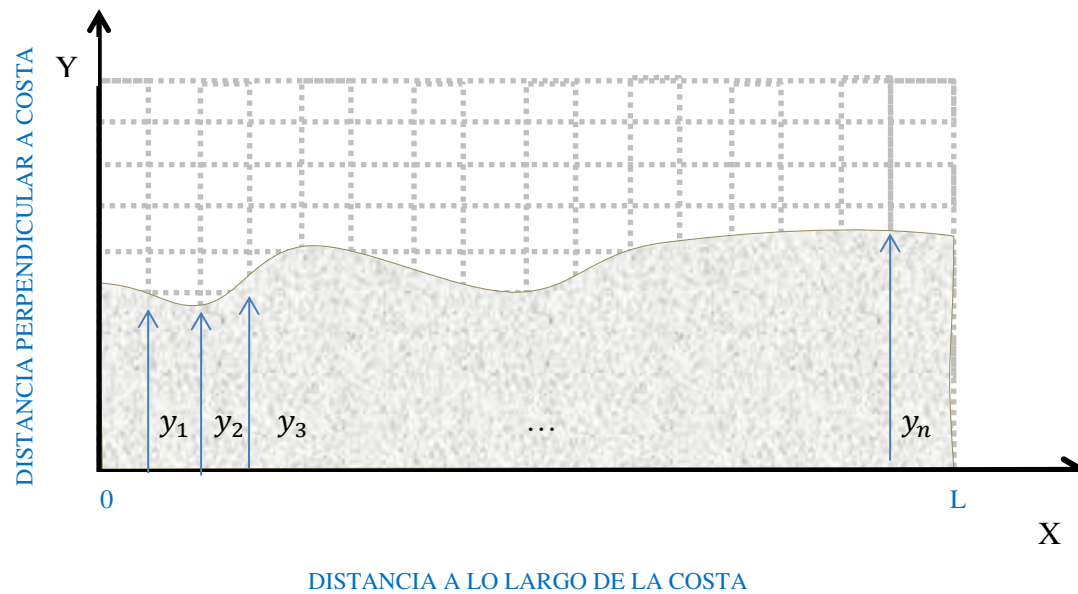


Figura 2.4.- Esquematización de la línea de costa. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.5, se tiene una vista transversal de la zona de playa, en la que observamos que existen 2 alturas importantes respecto al nivel medio del mar (NMM). La primera de ellas es la denominada profundidad de cierre (D_C), que es el límite de la zona activa de transporte longitudinal de sedimentos, y la segunda es la altura de la berma de la playa (D_B) que es el nivel máximo de inundación del oleaje y que puede estar afectada por efectos de erosión o sedimentación.

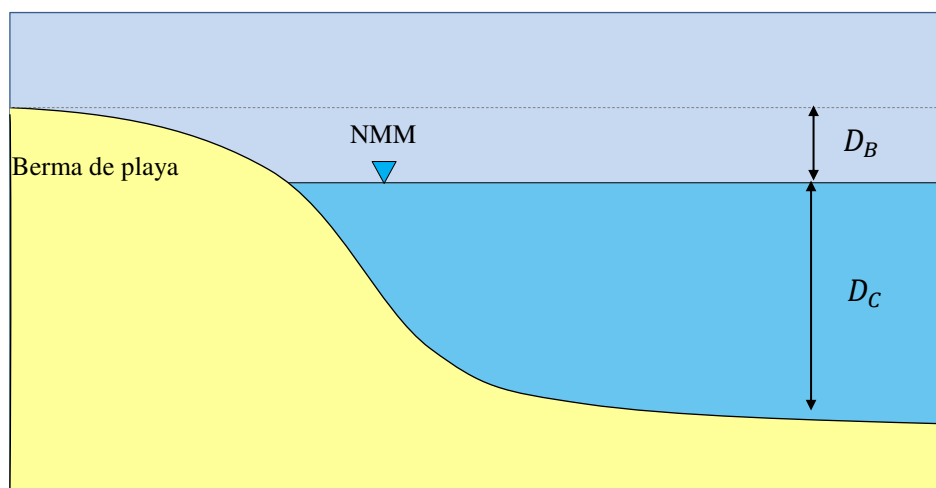


Figura 2.5.- Vista transversal de la zona de playa. Fuente: Hanson & Kraus, 1989

Donde:

D_B : Altura promedio de la berma respecto al Nivel del mar

D_C : Profundidad de cierre

2.3.1. Demostración de la ecuación de continuidad del sedimento

La evolución de la línea de costa, propuesta por Hanson & Kraus (1989), se expresa mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \cdot \left[\frac{\Delta Q}{\Delta x} - q \right] = 0 \quad [m/s] \quad (2.7)$$

Donde:

y : Posición de la línea de costa (perpendicular a la línea de referencia). Figura 2.6

x : Posición a lo largo de la línea de referencia. Figura 2.6

D_C : Profundidad de cierre

D_B : Altura promedio de la berma respecto al Nivel del mar

Q : Tasa de transporte longitudinal de sedimentos,

q : Caudal de sedimentos por unidad de longitud que entra en el área.

t : Tiempo en el que varía una cierta cantidad de sedimentos

A continuación, se describe la demostración paso a paso, de la ecuación (2.7) se describe a continuación:

El cambio en el volumen de la sección mostrada en la Figura 2.6 se calcula como sigue:

$$\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C) \quad [m^3] \quad (2.8)$$

Que muestra el cambio en el volumen debido al flujo de sedimentos que entran y salen de la sección a analizar.

Por otro lado, se puede expresar la tasa de cambio de volumen como $\frac{\Delta V}{\Delta t} = -\Delta Q$, donde $-\Delta Q$ es la reducción del caudal de sedimentos transportados a lo largo de la costa. Este cambio de volumen puede expresarse en función del tiempo como sigue: $\Delta V = -\Delta Q \cdot \Delta t$ y se muestra en la siguiente ecuación:

$$-\Delta Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta x \Delta y (D_B + D_C)}{\Delta t}$$

Ordenando y tomando límites para elementos infinitesimales:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{-1}{(D_B + D_C)} \frac{\Delta Q}{\Delta x} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

Resolviendo obtenemos

$$\frac{\partial y}{\partial t} = - \frac{1}{D_B + D_C} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)$$

Si a esta ecuación se le agrega una fuente aportante o restante de sedimentos denominada “q”, y se ordena, la ecuación anterior se reescribe como sigue:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_B + D_C} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad (2.9)$$

Un esquema de esta ecuación se muestra en la Figura 2.6 y Figura 2.7.

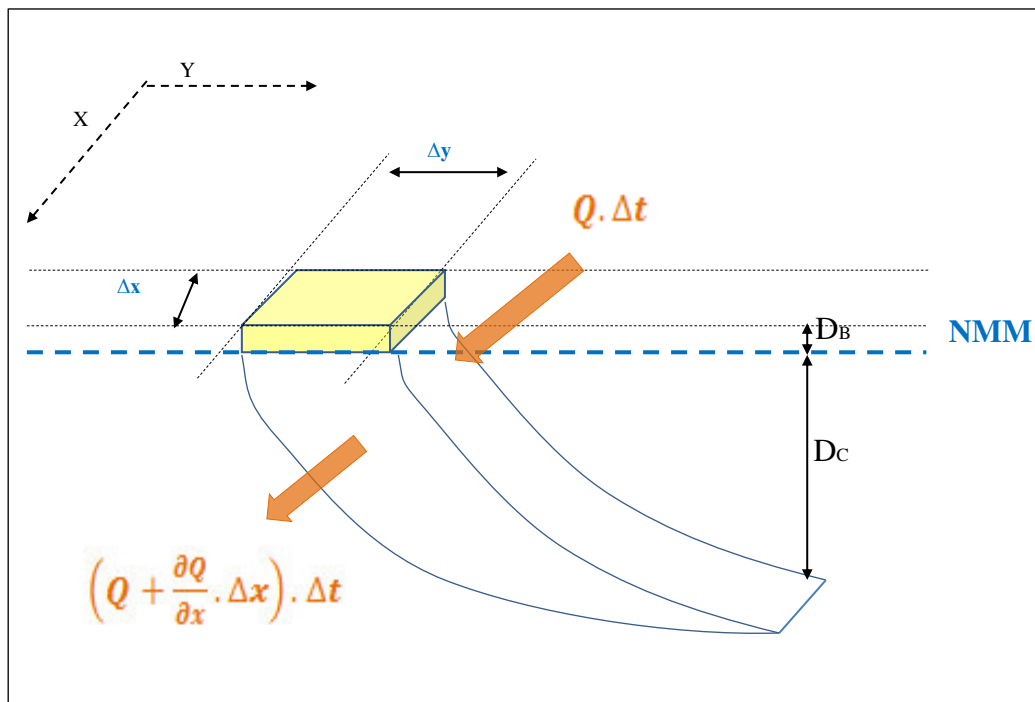


Figura 2.6.- Vista de perfil del funcionamiento del modelo. Fuente: Hanson & Kraus, 1989

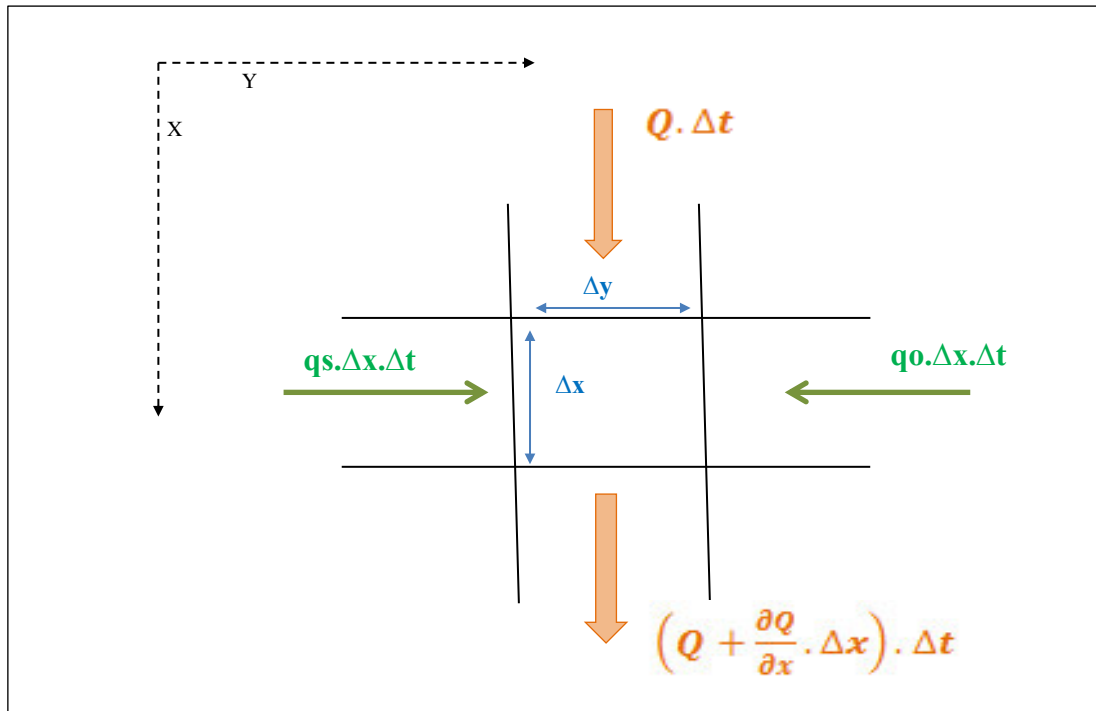


Figura 2.7.- Vista de planta del funcionamiento del modelo. Fuente: Hanson & Kraus, 1989

2.4. Evolución del perfil costero por presencia de estructuras marinas

Un tipo de estructuras marinas, son las estructuras perpendiculares a la línea de costa, (denominadas espigones), estas estructuras cumplen la función de retener sedimentos a lo largo del litoral o estabilizar una playa en un lado, originando un ensanchamiento importante de la playa y en el lado opuesto reduce el ingreso de sedimentos, ocasionando procesos de erosión. Ver Figura 2.8.

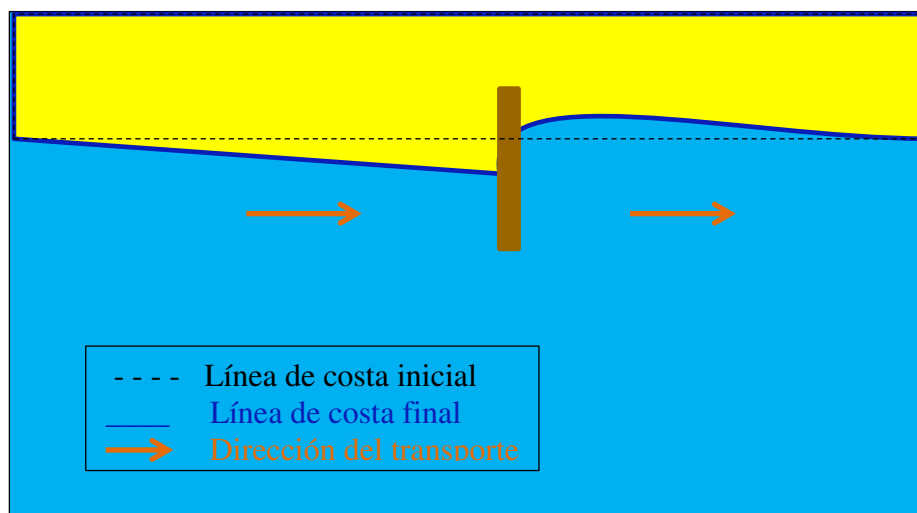


Figura 2.8.- Variación del perfil costero al incluir un espigón. Fuente: Elaboración propia

Otro tipo de estructuras, son los rompeolas que son construidos paralelos a costa, estas estructuras cumplen la función de disminuir la energía de las olas y crear una zona de sombra. Este tipo de estructuras pueden permitir formación de tómbolos, dependiendo de la distancia de su ubicación desde la costa. Ver Figura 2.9.

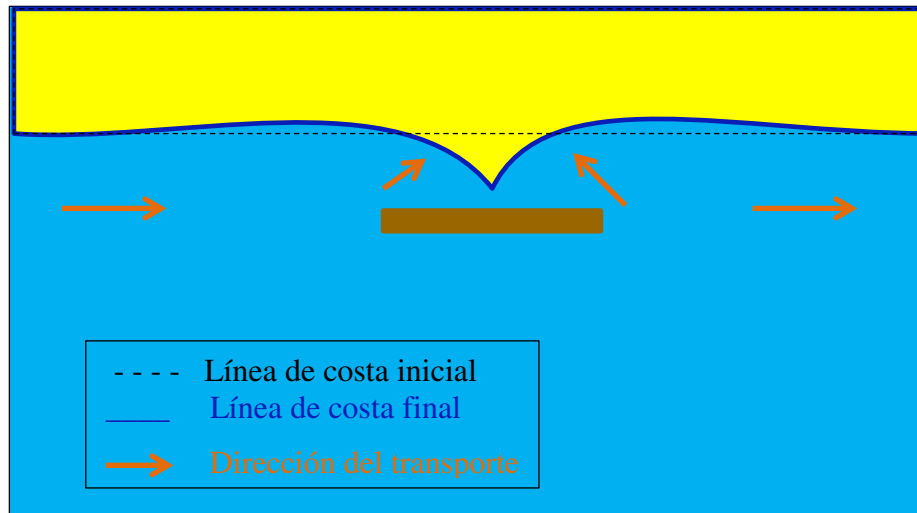


Figura 2.9.- Variación del perfil costero al incluir un rompeolas. Fuente: Elaboración propia

CAPITULO III.- AREA DE APLICACIÓN

3.1. Área de estudio

La bahía Ferrol se encuentra en la zona Norte del Perú, en la Provincia de Santa, Departamento de Ancash, entre las coordenadas: Longitud Oeste [78°40' - 78°33'] y Latitud Sur [09°03" - 09°11"]. Esta bahía está delimitada por el Norte con el cerro Chimbote y por el Sur con el cerro Península.

La bahía tiene aproximadamente 6 millas de ancho y 10 millas de largo y presenta una configuración semi cerrada de norte a sur por las Islas Blanca, Ferrol del Norte, Ferrol del Medio y Ferrol del Sur, lo cual da origen a tres canales de entrada a la bahía. A pesar de que la bahía Ferrol se encuentra protegida naturalmente por estas islas, sufre procesos de erosión, perdiéndose a través de los años gran cantidad de zonas de playas en la bahía; para contrarrestar esto, se han construido diversas obras de protección costera, como enrocados en diversas zonas. Así mismo, debido a la dinámica marina en la zona centro de la bahía se presenta gran movimiento de sedimentos, siendo el principal aportante de sedimentos el río Lacramarca, y en menor proporción el transporte eólico por dunas que son transportadas de la costa hacia el mar, las mismas que se ubican en la zona sur de la bahía (DHN, 2003) y que no serán consideradas en la presente tesis.

Para fines del presente estudio, la bahía El Ferrol será dividido en tres zonas: Norte, centro y sur. Ver Figura 3.1.

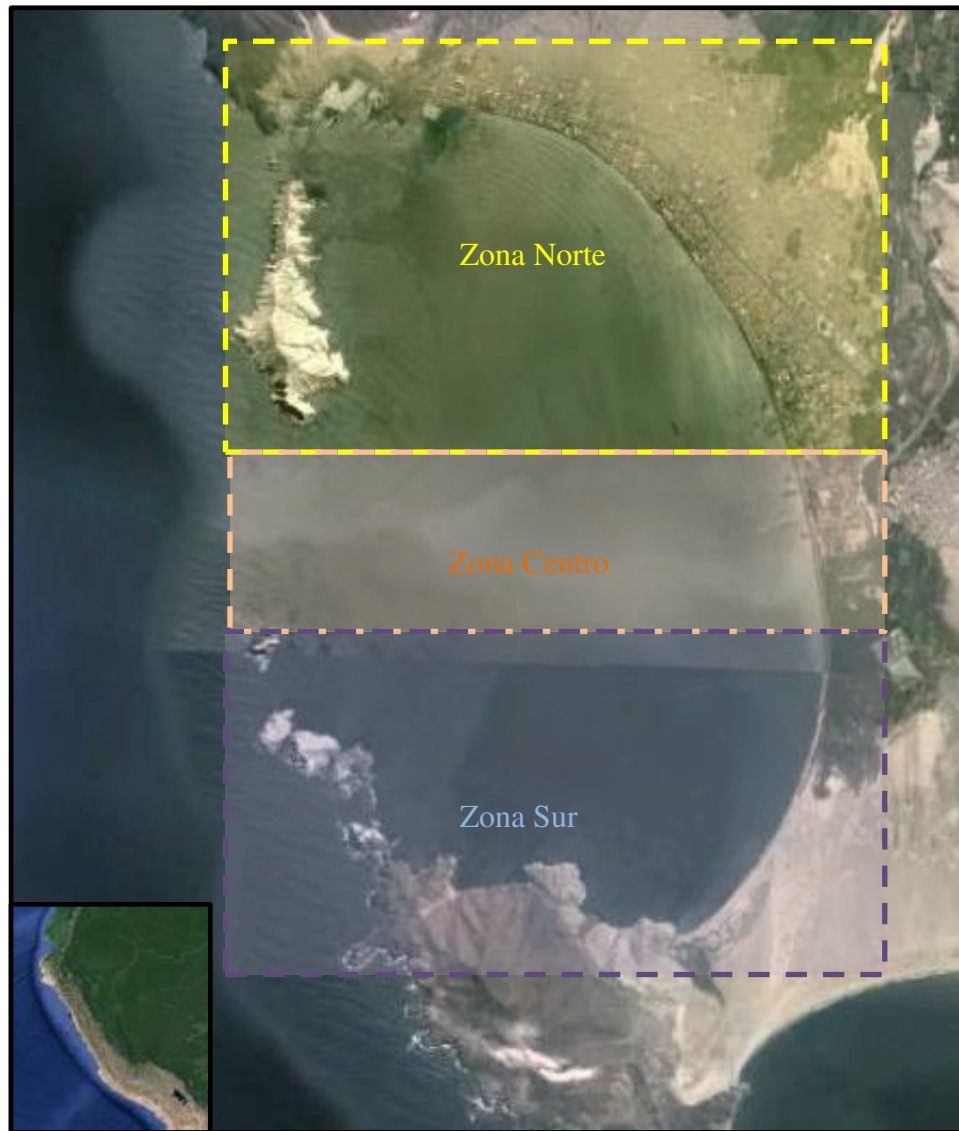


Figura 3.1.- Área de estudio. Fuente: Google Earth

3.2. Geomorfología del área de estudio

La bahía El Ferrol es una bahía semi cerrada que se encuentra limitada al Norte por el Cerro Chimbote, el cual presenta una altura aproximada de 560 msnm, y al Sur por el Cerro la Península con 524 msnm.

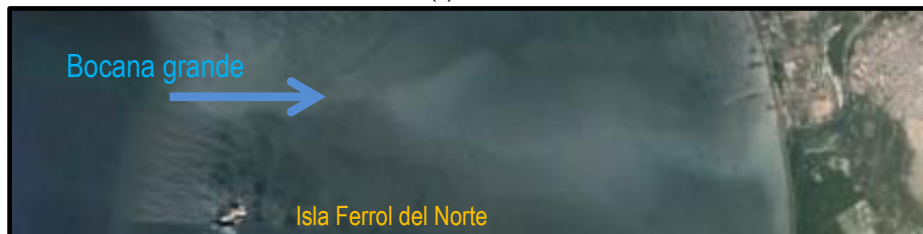
La bahía El Ferrol se encuentra semi cerrada por un conjunto de islas pequeñas. Así por la zona sur, las islas Ferrol (norte, medio y sur); mientras que por la zona Norte, se tiene la Isla Blanca. La presencia de estas islas permite la formación de tres canales de comunicación entre el mar abierto y las aguas de la bahía El Ferrol. Estos canales se denominan Paso del Norte, Paso del Medio y Paso del Ferrol, conocidos también como Bocana Chica, Bocana Grande y Bocana Mediana; respectivamente. Ver Figura 3.2.

De acuerdo a la información batimétrica de la Bahía Ferrol publicada por la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN), levantada en noviembre del 2006, se muestra que la isobata de 5m se encuentra aproximadamente 145m de costa contorneando el perfil costero de la bahía. Así mismo, la isobata de 10m se ubica en la parte central de la bahía, siendo la isobata de 20m el límite entre la bahía El Ferrol y el mar abierto, ya que une la Isla Blanca con las Islas Ferrol. Ver Figura 3.2 y Figura 3.3.

En la Figura 3.3 se muestra los contornos batimétricos de la bahía El Ferrol las cuales siguen la misma forma de la costa, encontrándose la profundidad de 10m aproximadamente 2890 m de costa.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2.- Geomorfología de la bahía Ferrol. (a)Zona Norte, (b)Zona Centro y (c)Zona Sur. Fuente: Google Earth

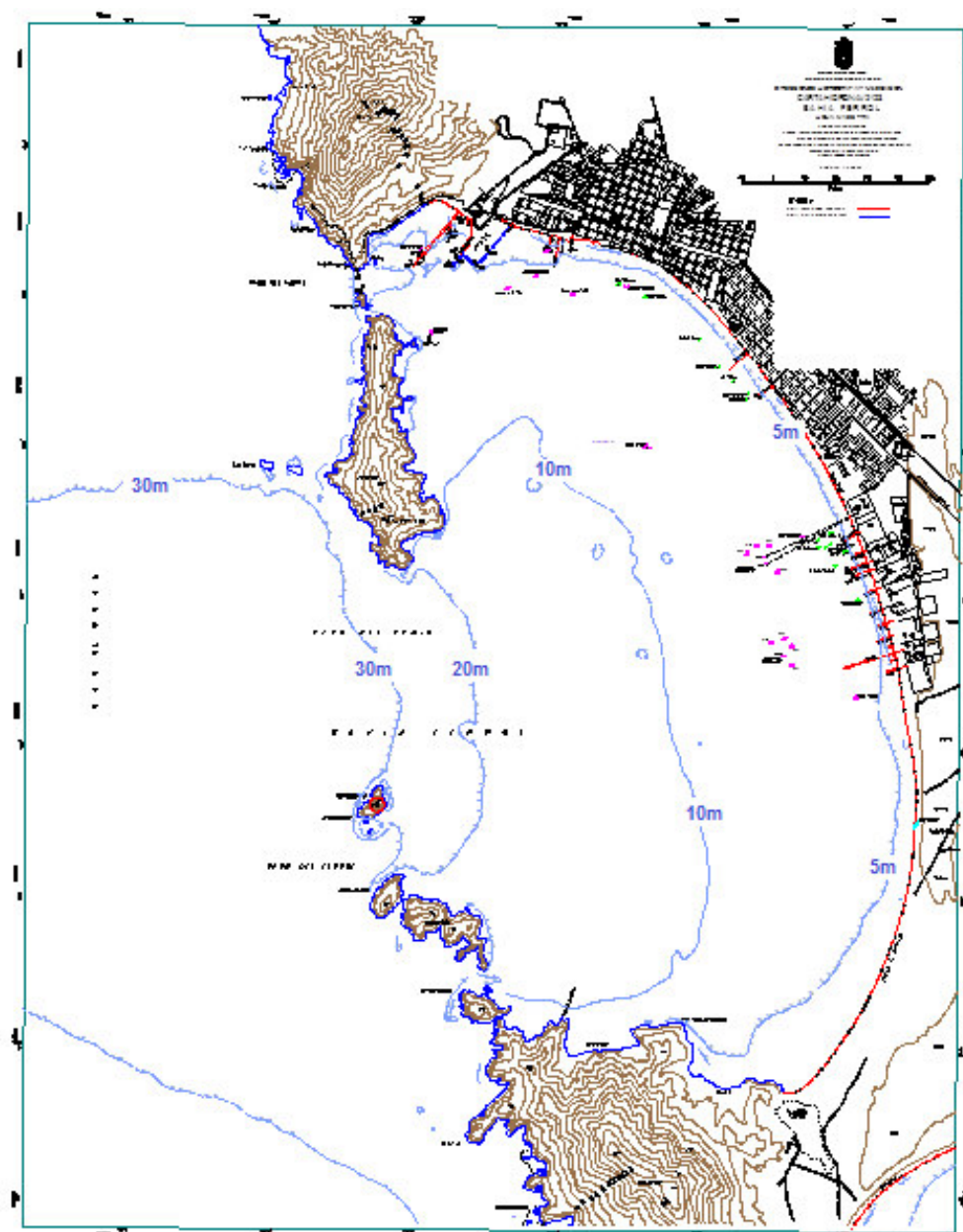
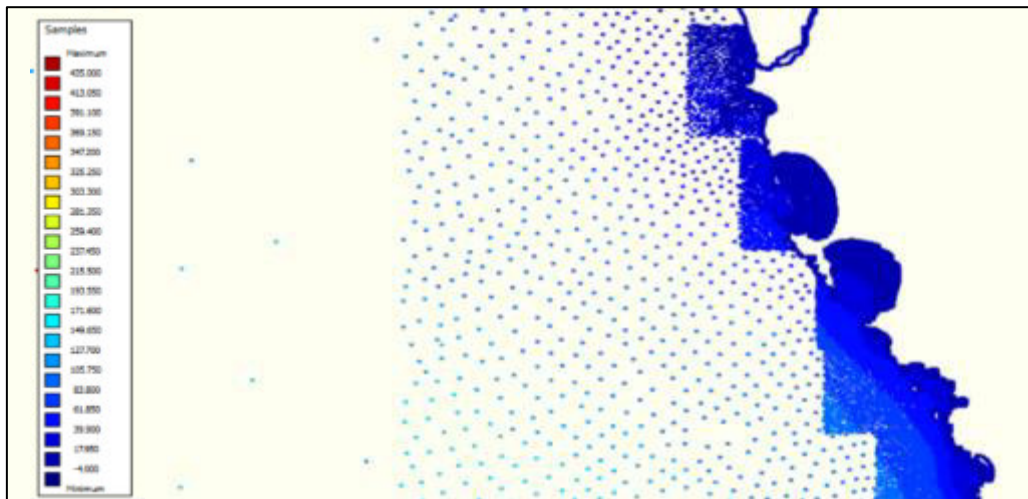


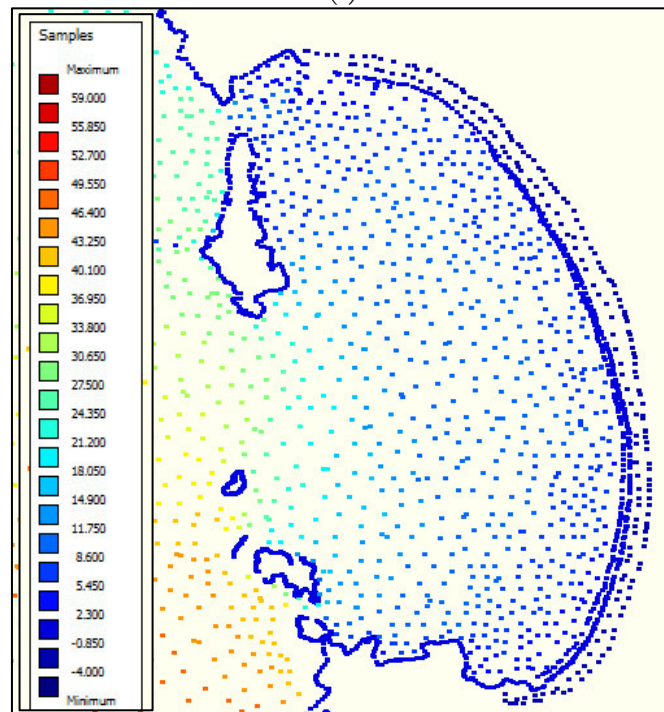
Figura 3.3.- Configuración batimétrica en la bahía El Ferrol. Fuente: DHN, 2008

3.3. Batimetría y perfil costero

Se han empleado la información de las cartas batimétricas de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN), proveniente de las cartas 223 (DHN-N°223, 2000) y 2236 (DHN-N°2236, 1995). En la Figura 3.4, se muestra los sondeos de profundidad, la misma que ha sido complementada con información global de batimetría (GEBCO) y perfil costero proveniente de Google Earth.



(a)



(b)

Figura 3.4.- Sondeos de batimetría de la DHN (a) En aguas profundas (b) En aguas poco profundas. Fuente: Elaboración propia

3.4. Olas

3.4.1. Olas en Aguas Profundas

La información de oleaje en aguas profundas corresponde a la base de datos del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) proveniente del reanálisis del modelo WAVE WATCH III (NOAA, 2017), donde se dispone de información global de oleaje desde enero 1979 hasta enero 2010, con intervalos de cada tres horas, dicha información puede ser encontrada en la siguiente página web:

<ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>

Con la finalidad de obtener las condiciones de oleaje en aguas profundas, se procedió a extraer información de olas para el punto ubicado en las coordenadas 79.5 Oeste y 9.5 sur (Figura 3.5). Dicho punto de extracción de olas se encuentra a aproximadamente 111km del área de estudio.



Figura 3.5.- Ubicación del punto de extracción de olas en aguas profundas. Fuente:
Elaboración propia

La información es extraída y procesada al formato de serie de tiempo de altura, periodo y dirección de ola, la misma que se muestra en la Figura 3.6, la misma que ha sido calibrada según la información de Minguez *et al.* (2011).

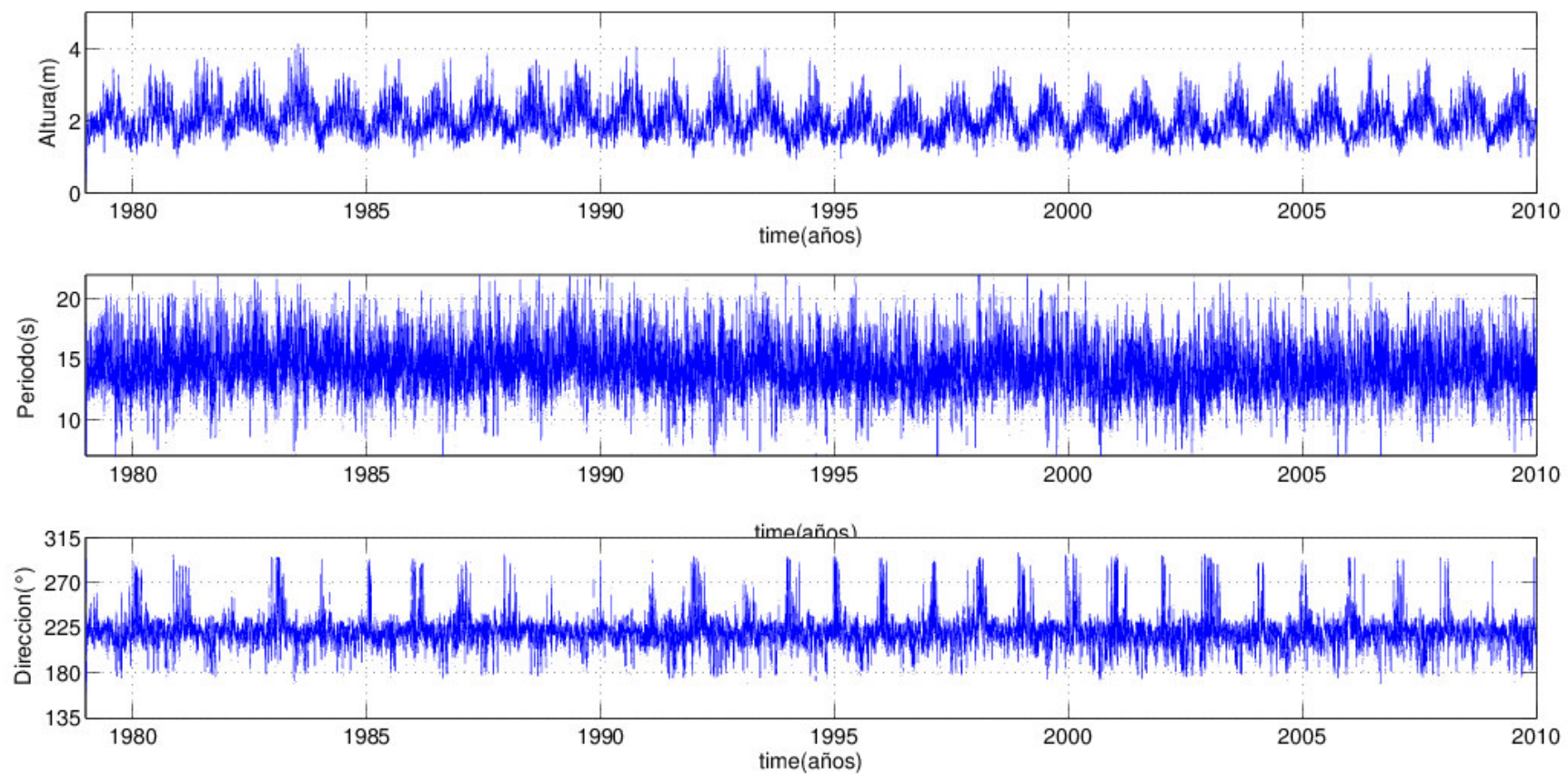


Figura 3.6.- Serie de tiempo de altura, dirección y periodo en aguas profundas. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.1 y Figura 3.7, se muestra que en ese punto de extracción de olas se presentaron alturas de olas entre 0.26m a 4.13m como mínima y máxima altura respectivamente. La altura de la ola media es de 2.01m.

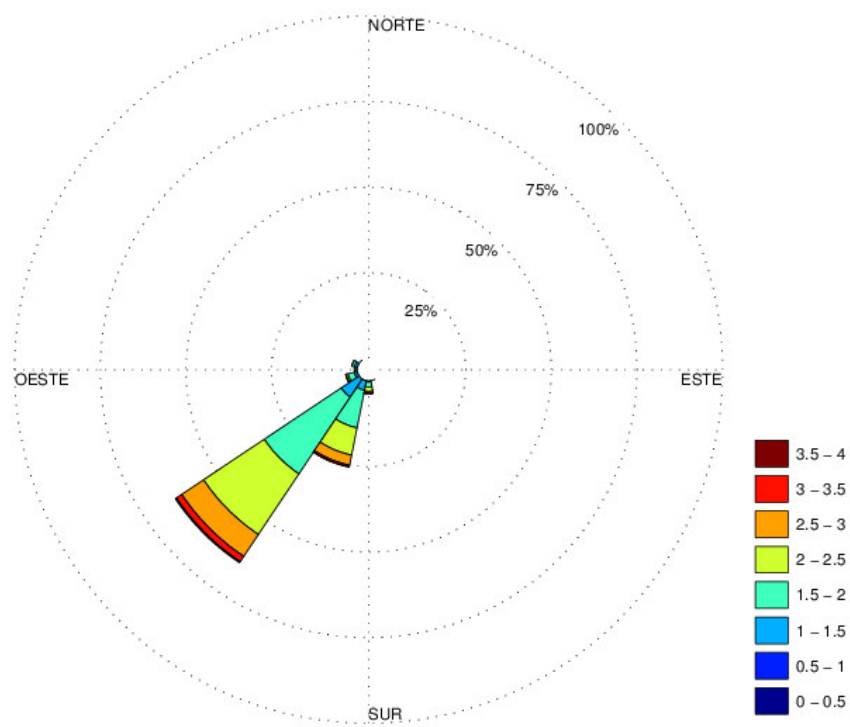
La dirección predominantemente de olas es del Suroeste con aproximadamente 62% de ocurrencia, las mismas que presentan alturas entre 2.0 a 2.5m y periodos de 14 a 16 segundos.

Así mismo, se observan otras direcciones de olas que van desde la dirección Noroeste hasta Sur, las mismas que presentan porcentajes de ocurrencia muy bajos.

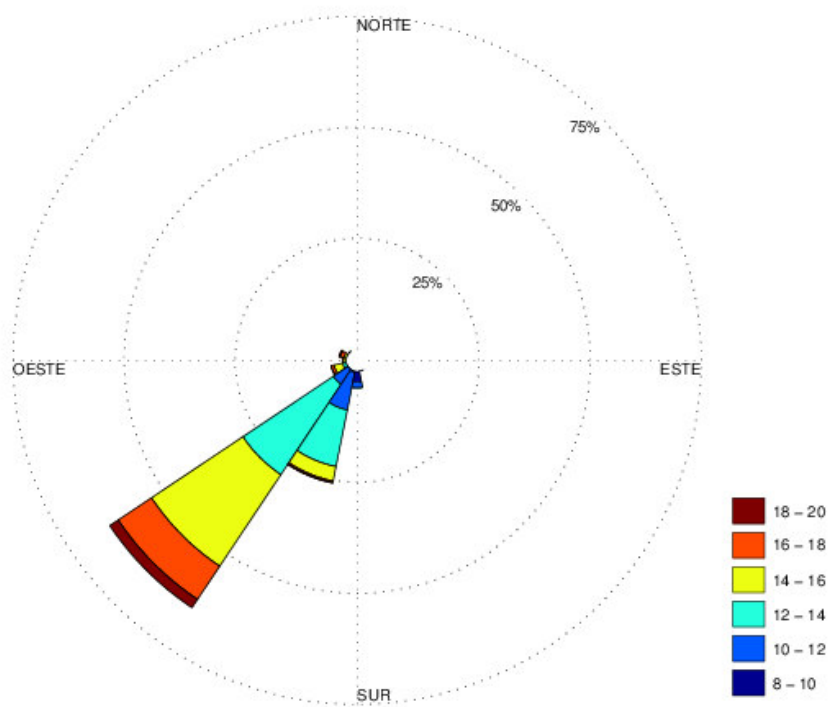
Tabla 3.1.- Estadística de las olas para el punto 79.5°Oeste y 9.5° Sur.

Estadística	Altura	Dirección	Periodo
	(m)	(°)	(s)
Mínimo	0.26	160.0	2.0
Percentil 25	1.67	212.1	12.6
Mediana	1.95	219.6	13.7
Media	2.01	219.6	13.8
Percentil 75	2.28	226.2	15.1
Máximo	4.13	318.9	23.0

Fuente: Elaboración propia



(a)



(b)

Figura 3.7.- Rosa de dirección de olas (a) Altura de olas [m] y (b) Periodo de olas [s].

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Olas en Aguas Poco Profundas

En el estudio realizado por la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN, 2008), se tiene información de olas medidas cerca a la bocana de la bahía Ferrol (Figura 3.8), el cual solo registró altura y periodo de olas desde 17 de marzo a 15 de junio 2007, en las coordenadas latitud: 9.128708° Sur y longitud: 78.604386° Oeste.

En la Figura 3.9, se muestra la serie de tiempo de altura en la que se observa que la altura de olas predominantes es 0.4m con máximas de hasta 1.1m, durante el tiempo de medición.

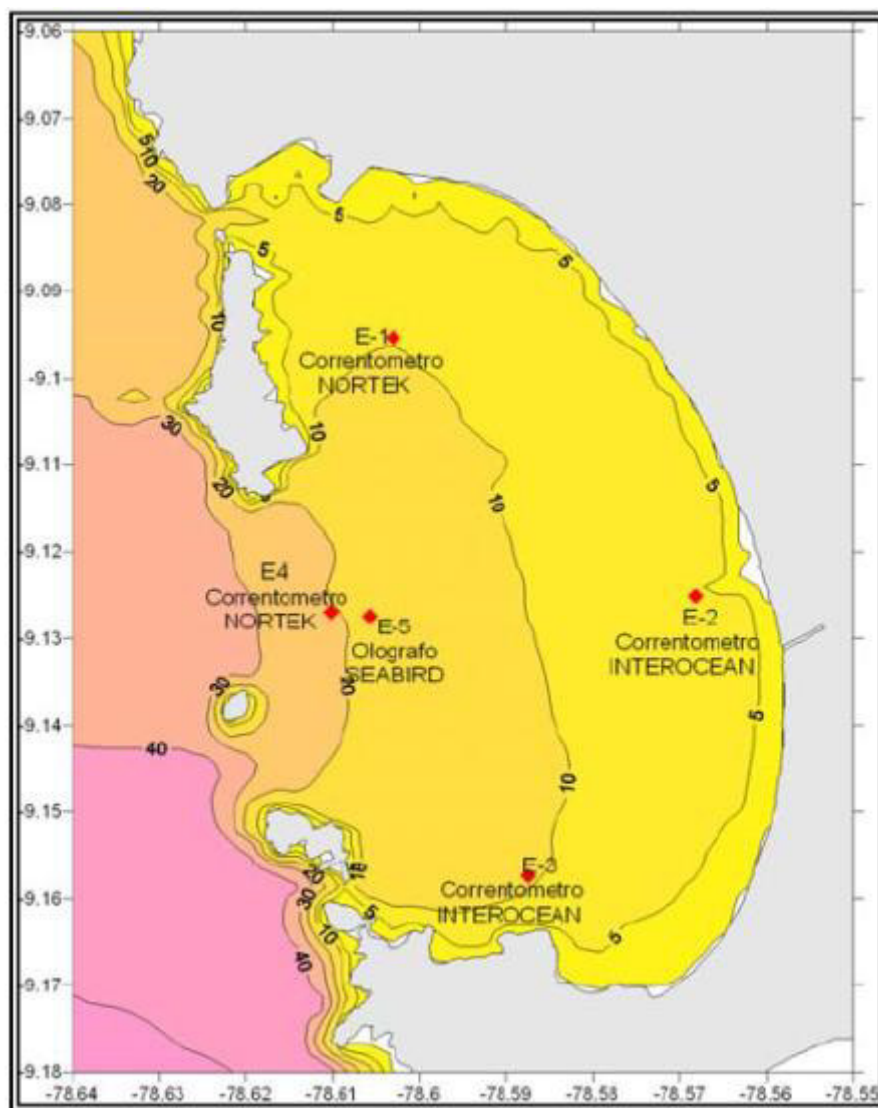
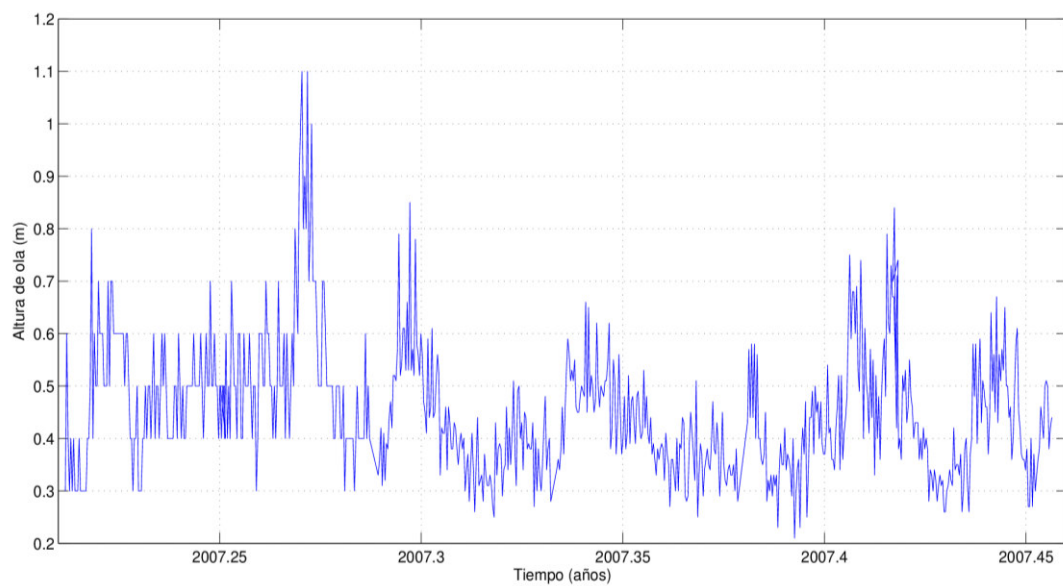
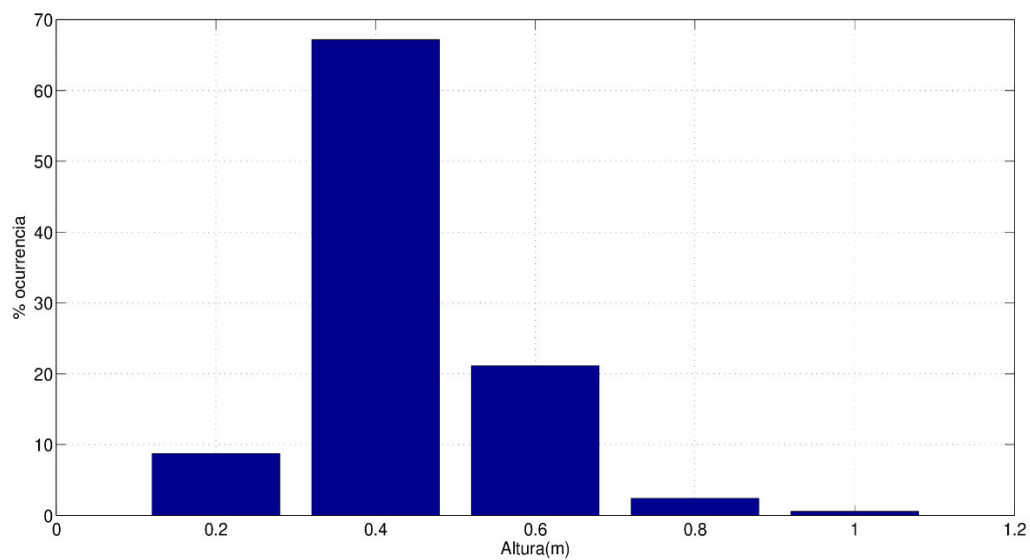


Figura 3.8.- Ubicación de la estación de medición de olas. Fuente: DHN, 2008



(a)



(b)

Figura 3.9.- Alturas de olas medidas en la bahía Ferrol – Chimbote (marzo – junio 2007). (a) Serie de tiempo. (b) Histograma de altura. Fuente: Elaboración propia

3.5. Granulometría de sedimentos

De acuerdo al estudio realizado por la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN, 2008), se muestra en la Figura 3.10 el tamaño de las partículas por cada estación de muestreo, observándose que las estaciones correspondientes A y B son las más cercanas a costa, por lo

que se considerará que el promedio de las estaciones cercanas a costa denominamos 1A, 1B, 2A, 2B, hasta 9A y 9B son las que representarán el área de estudio.

Los valores de $D_{50}=0.20\text{mm}$ y $D_{90}=0.45\text{mm}$ van a ser considerados como representativos de la zona cercana a costa en la bahía de Ferrol.

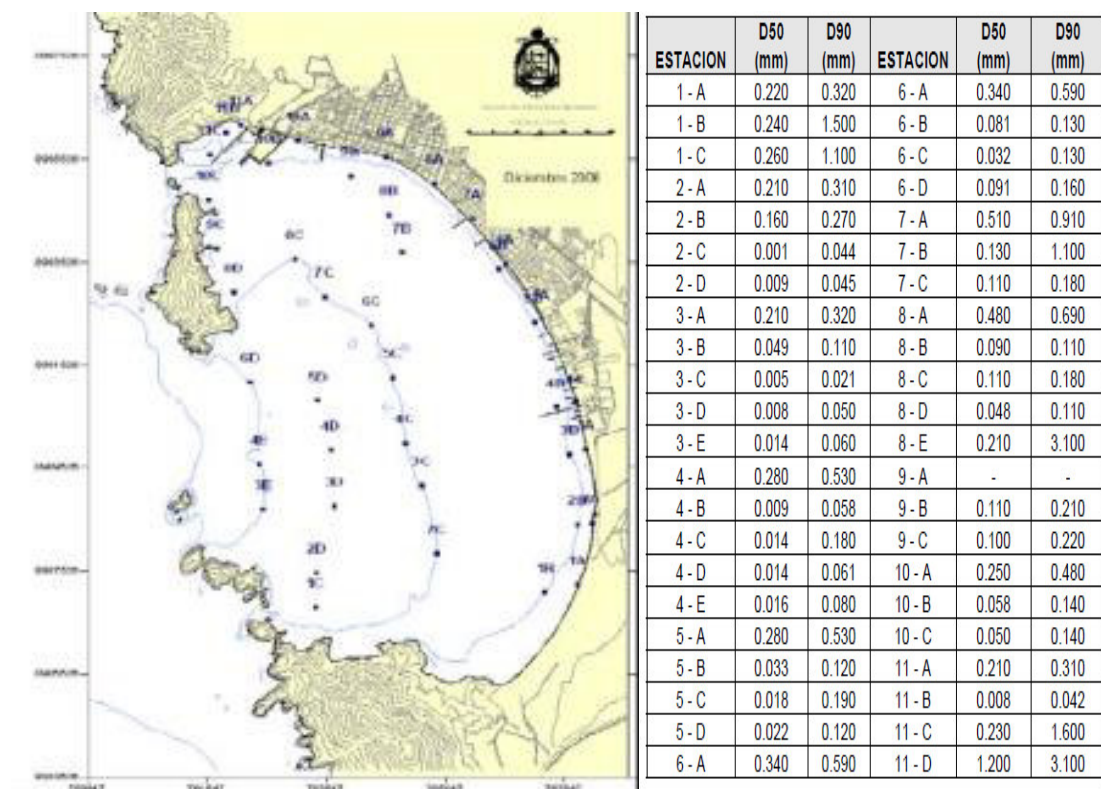


Figura 3.10.- Tamaño de partículas de sedimento superficial (D_{50} y D_{90}). Fuente: DHN, 2008

3.6. Procesos de erosión y sedimentación en la bahía

A partir de las imágenes de Google Earth se han sobrepuesto imágenes de 2 años distintos, que permitan identificar los procesos de erosión y sedimentación que predominan en la zona de estudio.

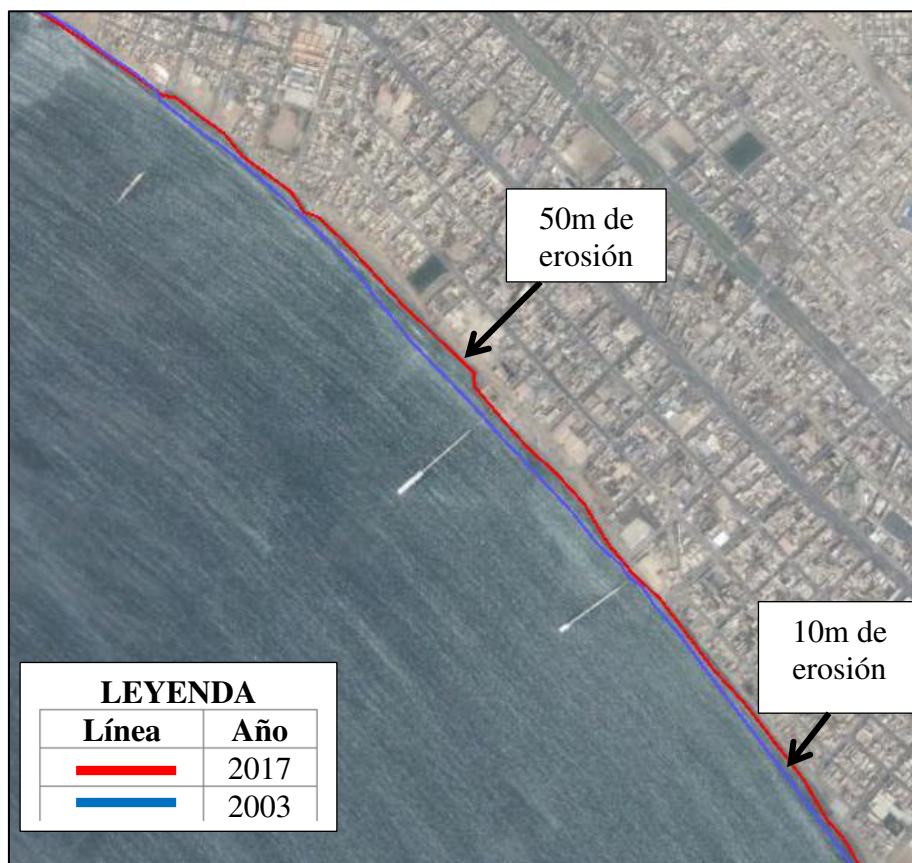
Para fines de describir los procesos que predominan en la bahía, se muestra en la Figura 3.11 la línea de costa de los años 2003 y 2017, correspondiente a la zona norte de la bahía, observándose procesos de erosión de hasta 50m.

Así mismo, en la Figura 3.12 se muestra que en la zona central de la bahía se presenta en la zona de la descarga del río un proceso de erosión de 40m, esto se debe a que, en el año 2009, el río cambio su zona de descarga aproximadamente 1km al sur de su posición original, dejando de descargar sedimentos en esa ubicación. Por otro lado, a 1km al sur de la ubicación original de la descarga del río se observa un proceso de sedimentación de 30m producto de la descarga del río.

En la Figura 3.13 se muestra en la zona sur de la bahía una sedimentación de hasta 25m entre los años 2003 a 2017.



(a)



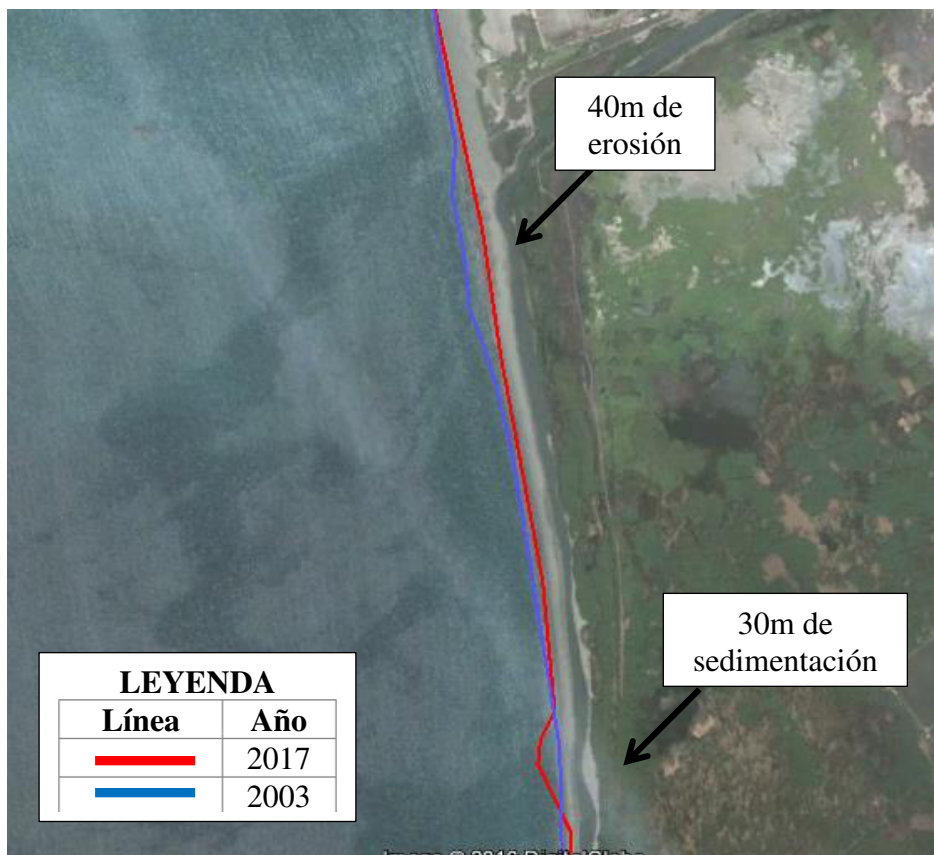
(b)

Figura 3.11.- Variación de la línea de costa (a) Zona norte de la bahía Ferrol (b) Detalle.

Fuente: Elaboración propia



(a)

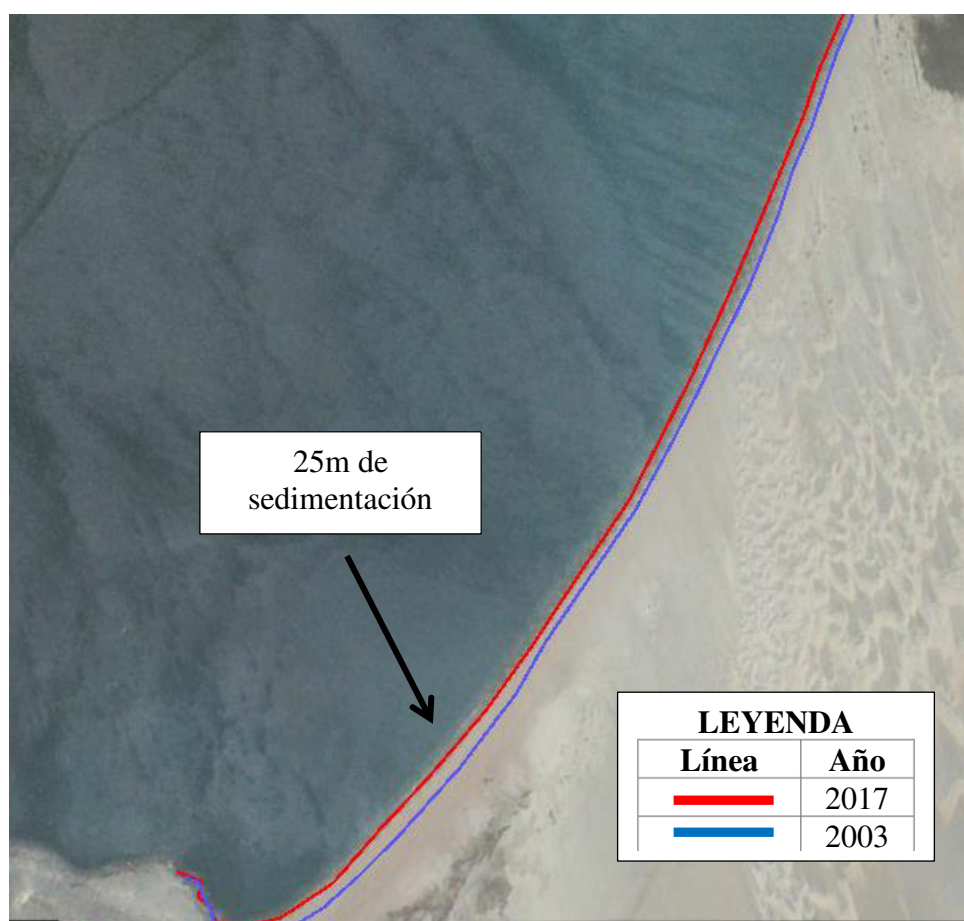


(b)

Figura 3.12.- Variación de la línea de costa (a) Zona centro de la bahía Ferrol (b) Detalle.
Fuente: Elaboración propia



(a)



(b)

Figura 3.13.- Variación de la línea de costa (a) Zona sur de la bahía Ferrol (b) Detalle.
Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de cuantificar los procesos de erosión o sedimentación en la bahía, se han definido puntos de control en el perfil costero, el mismo que permitirá identificar procesos de erosión o sedimentación que se hayan presentado en la bahía durante el año 2003 a 2017, calculando la tasa de variación de la costa de forma anual. Ver Figura 3.14.



Figura 3.14.- Puntos de control definidos en la bahía Ferrol. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.2 se observa que, de forma general, la zona norte y centro de la bahía sufren procesos de erosión, a pesar de la presencia del río Lacramarca, mientras que la zona sur de la bahía presenta procesos de sedimentación.

Tabla 3.2.- Procesos de erosión y sedimentación

Tramo	Variación del perfil costero		Tasa de variación (m/año)	Descripción
	2003	2017	2003 - 2017	
L1	0	31.8	2.27	Tendencia a sedimentar
L2	0	32.06	2.29	
L3	0	29.17	2.08	
L4	0	29.94	2.14	
L5	0	19.28	1.38	
L6	0	16.97	1.21	
L7	0	-5	-0.36	Tendencia a erosionar
L8	0	35.12	2.51 (Río en la actualidad)	
L9	0	-10	-0.71	
L10	0	-35	-2.5 (Río hasta el año 2009)	
L11	0	0	0.00	
L12	0	0	0.00	
L13	0	-2	-0.14	
L14	0	-2	-0.14	
L15	0	-26	-1.86	
L16	0	-34	-2.43	
L17	0	-25	-1.79	
L18	0	5	0.36	
L19	0	-9.6	-0.69	
L20	0	-9.5	-0.68	
L21	0	6.4	0.46	

Fuente: Elaboración propia

3.7. Sedimentos del río Lacramarca

El sedimento proveniente del río Lacramarca fue cuantificado en el estudio presentando por la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN, 1995), donde se menciona la cantidad de sedimentos en suspensión y en fondo, los mismos que se serán empleados en la presente tesis para describir la cantidad total de sedimentos que aporta el río Lacramarca, los mismos que se describen a continuación:

$$Q_T = Q_S + Q_F \quad (3.1)$$

Donde:

Q_T = Caudal de Sedimentos Total

Q_S = Caudal de Sedimentos en Suspensión

Q_F = Caudal de Sedimentos en Fondo

3.7.1. Sedimentos en suspensión

De acuerdo a información tomada del estudio de DHN (1995), tenemos en la Tabla 3.3 los promedios y las concentraciones de sólidos en suspensión del río, los mismos que se muestran a continuación:

Tabla 3.3.- Carga de sedimentos aportados por el río Lacramarca

Referencia	Caudal (m³/s)	Concent SS (mg/l)	Carga SS (Tn/día)	Días/ Estac.	Carga SS (Tn) año 2006	años/ periodo	Carga SS (Tn)	Carga SS (m³)
Fen.El Niño extraord.1998	280	1,500	36,288.0	1.0	36,288.0	1.0	36,288	13,694
Fen.El Niño extraord.1983/84	120	1,500	15,552.0	1.0	15,552.0	1.0	15,552	5,869
Fen.El Niño extraord.1983/84 y 1998	80	1,350	9,331.2	89.0	830,476.8	2.0	1'660,954	626,775
Fenómeno El Niño - Estiaje	65	1,250	7,020.0	275.0	1'930,500.0	2.0	3'861,000	1'456,961
Fen.El Niño 1985, 89,72,75,87,92	60	1,183	6,134.4	90.0	552,096.0	6.0	3'312,576	1'250,029
Resto de año Niños 1985-92)	10	1,108	957.6	275.0	263,340.0	6.0	1'580,040	596,242
Avenida Año normales 1980-1985	35	600	1,814.4	90.0	163,296.0	20.0	3'265,920	1'232,423
Estiaje años normales 1980-1985	2.5	137	29.6	275.0	8,143.7	20.0	162,875	61,462
Avenida Año normales 1986-2006	40	600	2,073.6	90.0	186,624.0	18.0	3'359,232	1'267,635
Estiaje años normales 1986-2006	7.35	137.1	87.1	275.0	23,942.6	18.0	430,967	162,629
PROMEDIO	70	936.5					17'685,403	6'673,737

Fuente: DHN, 2008

Con el promedio de Caudal líquido y los sólidos en suspensión tenemos:

$$Q_S = \frac{q_L \cdot C}{\rho_s} \quad (3.2)$$

Donde:

Q_S = Caudal Sólido de sedimentos

q_L = Caudal líquido del río ($70 \frac{m^3}{s}$) - Tabla 3.3

C = Concentraciones de Sólidos en Suspensión ($936.5 \text{ mg/L} = 0.9365 \frac{kg}{m^3}$) - Tabla 3.3

L = Ancho del río Lacramarca (50m)

ρ_s = Densidad del sedimento de arena (2650 kg/m^3)

Reemplazando tenemos:

$$Q_S = \frac{70 \frac{m^3}{s} * 0.9365 \frac{kg}{m^3}}{2650 \text{ kg/m}^3} = 0.025 \frac{m^3}{s}$$

3.7.2. Sedimentos en fondo

Así mismo, según información de diferencias batimétricas realizadas por DHN, en la zona de la descarga del río Lacramarca, se menciona “En cuanto al cálculo del volumen de sedimentos total acumulado en dicho periodo, se calculó un volumen aproximado de $14'000,000 \text{ m}^3$ en un periodo de 13 años comprendidos entre 1994 – 2006” (DHN, 1995).

Con esta información, podemos calcular el volumen de sedimentos en fondo:

$$Q_F = \frac{V}{t} \quad (3.3)$$

Donde:

Q_F = Caudal de Sedimentos en Fondo

V = Volumen de sedimentos ($14'000,000 \text{ m}^3$)

t = Tiempo (13 años x 365 días x 24 horas x 3600 segundos)

$$Q_F = \frac{14'000,000 \text{ m}^3}{13 \text{ años} \times 365 \text{ días} \times 24 \text{ horas} \times 3600 \text{ segundos}} = 0.034 \frac{m^3}{s}$$

Entonces los sedimentos totales a ser considerados como aportantes de sedimentos del río son:

$$Q_T = Q_S + Q_F = 0.025 \frac{m^3}{s} + 0.034 \frac{m^3}{s} = 0.059 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_T = 0.059 \frac{m^3}{s}$$

CAPITULO IV.- MODELACIÓN NUMÉRICA

A continuación, se presenta el proceso de modelación numérica, donde se incluye la descripción de los modelos a emplearse, como el modelo olas y el desarrollo del modelo de variación de línea de costa.

4.1. Descripción del modelo de olas empleado

El modelo de olas empleado es el DELFT3D (DELTARES, 2014) el mismo que es basado en el modelo SWAN (The SWAN team, 2006) y empleado por DELTARES (TuDelft, 2016), el cual es empleado para propagar las olas desde aguas profundas a poco profundas. La particularidad de este modelo es que permite un tipo de grilla variable en la zona de interés, y presenta un entorno amigable de generación de malla.

En la malla empleada se usa la ubicación en base a la información de latitud y longitud, y se emplea la convención náutica en la que el inicio de la dirección olas es de dirección Norte. La forma como se define la grilla computacional se muestra en la Figura 4.1, donde en cada punto de grilla se obtiene la batimetría por interpolación lineal.

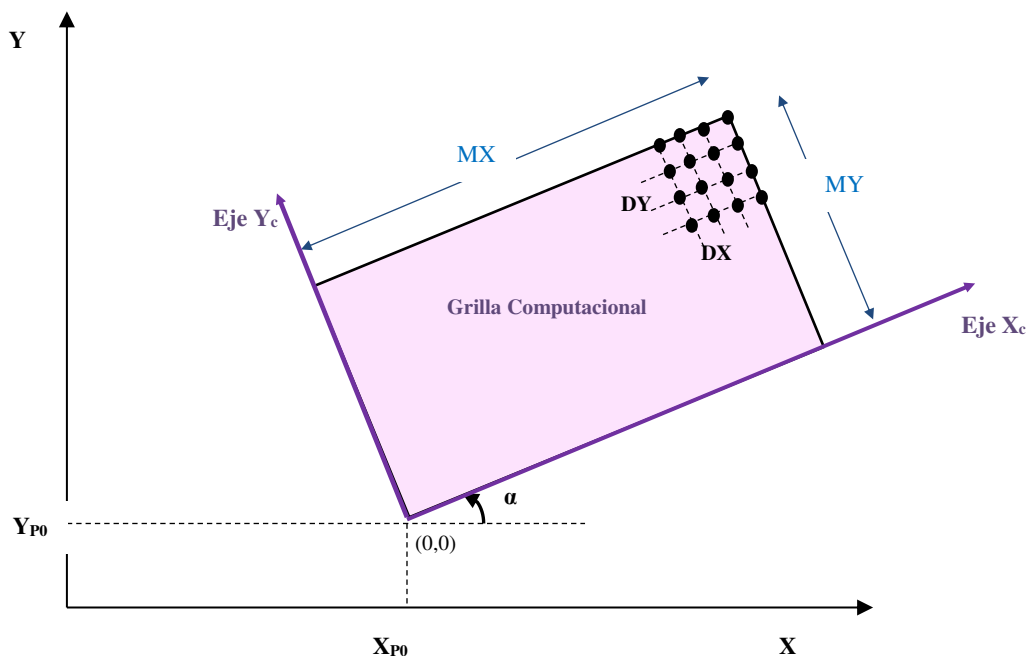


Figura 4.1.- Definición de grillas del modelo DELFT3D-WAVE. Fuente adaptado de DELTARES, 2014

La grilla computacional es una grilla en 4 dimensiones, los espacios " x - y " espacial, y los espacios " θ - σ " direccional y frecuencial.

4.1.1. Ecuación de Balance de la densidad del espectro de olas

Las olas en SWAN son descritas por la densidad del espectro $N(\sigma, \theta)$, y la densidad de la energía $E(\sigma, \theta)$ la misma que se describe en la Figura 4.3 y en la siguiente ecuación:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad [m^2 s^2] \quad (4. 1)$$

Dónde:

$N(\sigma, \theta)$: Densidad del espectro
$E(\sigma, \theta)$: Densidad de la energía $[m^2 s]$
$\sigma^2 = gk \cdot \tanh(kh)$: Frecuencia angular de la ola $[1/s]$

La evolución del espectro de olas en SWAN es descrito por la ecuación de balance espectral, el cual se realiza en coordenadas cartesianas, que es descrito como:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (4. 2)$$

Donde:

$\frac{\partial}{\partial t} N$: Tasa local del cambio de la densidad del espectro de energía por acción del tiempo $[m^2 s]$
$\frac{\partial}{\partial x} C_x N, \frac{\partial}{\partial y} C_y N$: Representa el termino advectivo de la densidad espectral (propagación hacia costa en los espacios (x,y) en unidades $[m^2 s]$.
$\frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N$: Cambios de la frecuencia relativa debido a variaciones en profundidades y las corrientes, en unidades $[m^2 s]$.
$\frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N$: Representa los efectos de la refracción debido al cambio de profundidad en unidades $[m^2 s]$.
$S = S(\sigma, \theta)$: Representa la interacción de los efectos de generación, disipación y la no linealidad de la interacción entre olas $[m^2]$.

4.1.2. Ecuación de Balance de la densidad del espectro de olas de forma estacionaria

La ecuación (4.2) de forma estacionaria puede ser descrita como se muestra:

$$\frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (4.3)$$

Por otro lado, SWAN resuelve los siguientes procesos:

- Disipación por whitecapping (antes de la rompiente) y parámetros de rompiente.
- La no linealidad de la interacción entre olas

Generación:

La generación puede ser por vientos, sin embargo, este parámetro no será tratado en la presente tesis.

Disipación:

La disipación en términos de energía de ola es representado por la suma de 3 diferentes contribuciones (DELTARES, 2014):

- Whitecapping $S_{ds,w}(\sigma, \theta)$
- Fricción de fondo $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$
- Rompiente $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$

- a) Whitecapping es principalmente controlado por el empinamiento de la ola. En SWAN está dado por (DELTARES, 2014):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -C'_{ds} \left(\frac{B(k)}{B_r} \right)^{\frac{p}{2}} (\tanh(kh))^{\frac{2-p_0}{4}} \cdot \sqrt{gk} \cdot E(\sigma, \theta) \quad [m^2] \quad (4.4)$$

Donde:

$$B(k) : \text{Función de densidad } B(k) = \int_0^{2\pi} C_g k^3 E(\sigma, \theta) d\theta$$

Si

$B(k) > B_r$ Las olas rompen y el exponente p es igual a un parámetro de calibración p_0 .

$B(k) \leq B_r$ No hay ruptura, pero alguna disipación residual es proveído $p=0$.

B_r : 1.75×10^{-3} (Límite de nivel de saturación)

C'_{ds} : 5.0×10^{-3} (Coeficiente de proporcionalidad)

K : Número de onda

σ : Frecuencia media

k : Número de onda media

- b) Fricción de fondo. - Es la disipación inducida por la variación de la profundidad, que induce la fricción del fondo (Shemdin,1978) que generalmente pueden representarse como:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} \cdot E(\sigma, \theta) \quad [m^2] \quad (4.5)$$

$$C_{bottom} = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms} \quad : \text{Coeficiente de fricción de fondo } [m^2/s^3]$$

- c) Rompiente inducido por el cambio de profundidad. - El proceso de la profundidad inducida ha sido representado de la siguiente manera:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = -\frac{D_{tot}}{E_{tot}} \cdot E(\sigma, \theta) \quad [m^2] \quad (4.6)$$

Donde:

E_{tot} y D_{tot} : Es la tasa de disipación de la energía total y debido a la rompiente de olas respectivamente, este parámetro depende del parámetro de rompiente.

La no linealidad de interacción entre olas:

Esta consideración evita que se produzca la resonancia de olas cuando el oleaje proviene de los 4 cuadrantes.

- Para el cuadrante I, II, la frecuencia es definida como $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$
- Para el cuadrante III y IV, la frecuencia es definida como $\sigma_3 = \sigma_4 = 1.25\sigma$

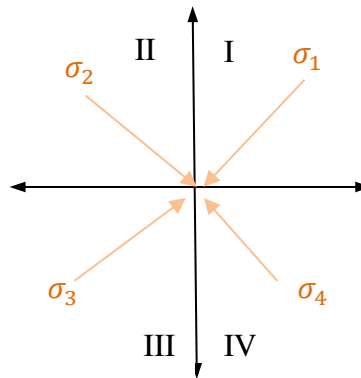


Figura 4.2.- Esquema de la frecuencia en cada cuadrante. Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Esquema numérico de la ecuación de balance espectral estacionario

Se resuelve numéricamente la ecuación de balance de la energía espectral (ecuación 4.2), y se aproxima con esquemas de diferencias finitas en las cuatro dimensiones (tiempo, espacio geográfico x-y, así como el espacio espectral $\theta - \sigma$).

El dominio geográfico es discretizado con una grilla rectangular con resolución Δx , Δy para los ejes coordenados x e y respectivamente. Así mismo, el dominio espectral del modelo es discretizado con una resolución direccional constante $\Delta \theta$ y frecuencia relativa $\Delta \sigma / \sigma$.

El esquema empleado, es un esquema implícito upwind, el mismo que se descompone en dos partes (DELTARES, 2014):

- 1ra parte: El primer y segundo término corresponde a una propagación geográfica espacial (x – y), con un esquema upwind de primer orden.
- 2da parte: El tercer y cuarto termino corresponde a una propagación espectral ($\theta - \sigma$), con un esquema upwind de 2do orden.

Esquema implícito Upwind de 1er orden

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{[C_x N]_{i_x} - [C_x N]_{i_x-1}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^n + \left[\frac{[C_y N]_{i_y} - [C_y N]_{i_y-1}}{\Delta y} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^n \\
 & + \left[\frac{(1-v)[C_\sigma N]_{i_\sigma+1} + 2v[C_\sigma N]_{i_\sigma} - (1+v)[C_\sigma N]_{i_\sigma-1}}{2\Delta\sigma} \right]_{i_y, i_y, i_\theta}^n \\
 & + \left[\frac{(1-\eta)[C_\theta N]_{i_\theta+1} + 2\eta[C_\theta N]_{i_\theta} - (1+\eta)[C_\theta N]_{i_\theta-1}}{2\Delta\theta} \right]_{i_y, i_y, i_\sigma}^n \\
 & = \underbrace{\left[\frac{S}{\sigma} \right]_{i_y, i_y, i_\sigma}^{n^*}}_{\text{Parámetro de generación, disipación y la no linealidad de la interacción entre olas.}}
 \end{aligned}
 \tag{4. 7}$$

Esquema implícito Upwind de 2er orden

Donde:

i_y, i_y, i_σ y i_θ son contadores de grillas y $\Delta x, \Delta y, \Delta\sigma$ y $\Delta\theta$ son los incrementos en espacios geográficos y espectral. (Fuente: DELTARES, 2014)

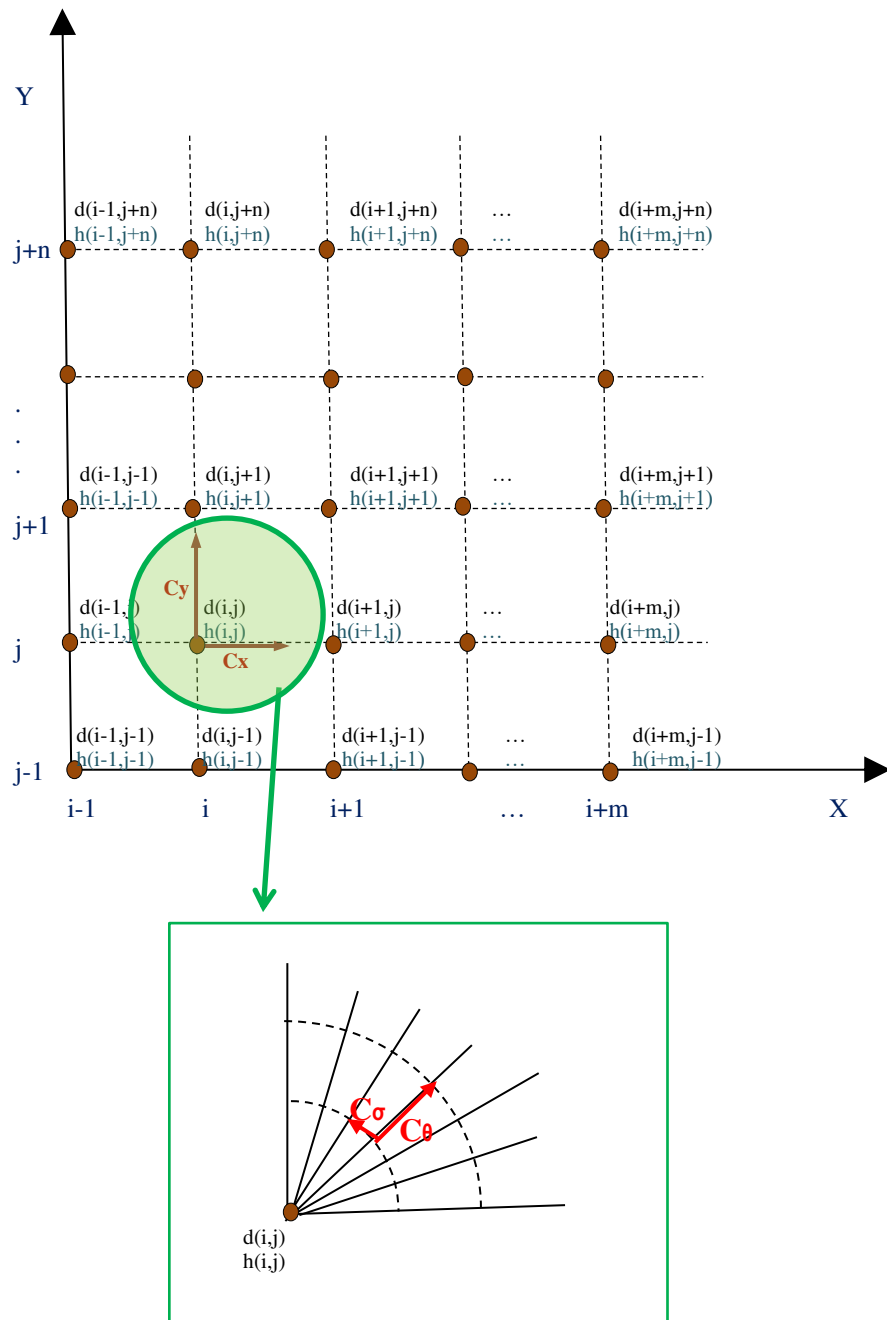


Figura 4.3.- Esquema de grillado usado por el modelo DELFT3D WAVE. Fuente:
Elaboración propia

4.1.4. Condiciones de frontera

Se debe elegir la ubicación de inicio y final de los puntos de grilla en aguas profundas, así como las condiciones de oleaje (altura, dirección y periodo), el mismo que se describe a continuación:

Lado Norte, Sur, Oeste: Serie de tiempo de altura, dirección y periodo de olas del modelo WWATCH III. Ver Figura 4.4

Lado Este: Se encuentra el perfil costero. Ver Figura 4.4.

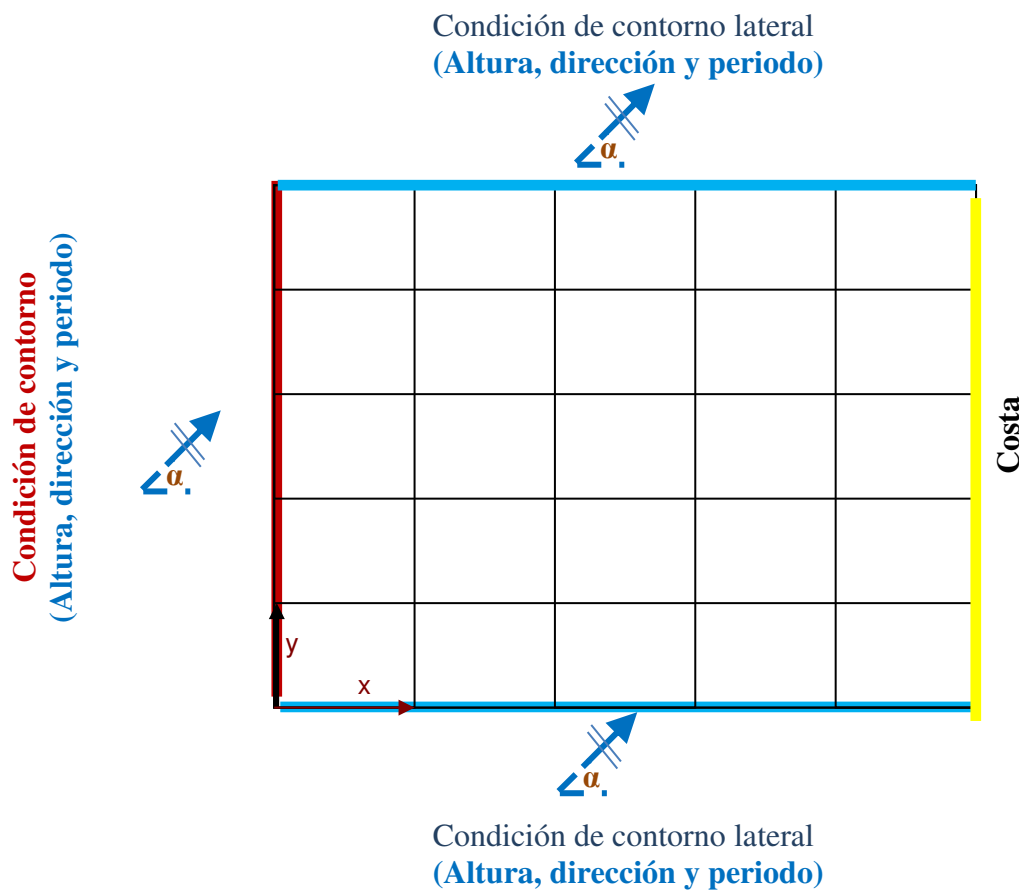


Figura 4.4.- Condiciones de frontera del modelo. Fuente: Elaboración propia

4.2.- Desarrollo del modelo de transporte de sedimentos

4.2.1.- Descripción del modelo de variación de línea de costa

Para la modelación de la variación de la línea de costa se emplea la información proveniente del manual del modelo Generalized Model For Simulating Shoreline Change - GENESIS (Hanson & Kraus, 1989) que está basado en la teoría de Pelnard-Considere (1956), el cual emplea la ecuación de la conservación de volumen de sedimento a largo plazo, es decir el transporte longitudinal a costa (a lo largo de la costa)

El modelo planteado mediante la conservación de volumen de sedimento permite simular cambios espaciales y temporales de la línea de costa, basando en la idea de que el perfil costero se traslada en la dirección perpendicular a la línea de costa en otras palabras o erosiona o sedimenta.

Así mismo, respecto al ángulo de la costa respecto a la ola incidente, tenemos:

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - \alpha_s \quad (4.8)$$

La misma que se esquematiza en la Figura 4.5.

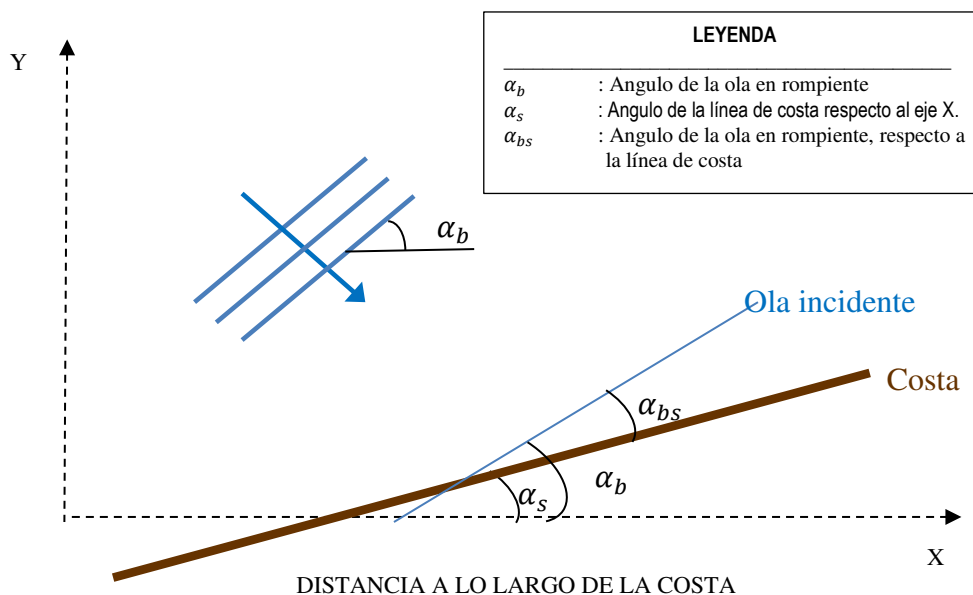


Figura 4.5.- Definición del ángulo de la ola modelo del modelo. Fuente: Hanson & Kraus,

1989

4.2.2. Condiciones iniciales

Se considera como condición inicial la línea de costa medida, la cual tendrá una variación en función a una línea base ubicada en el eje X, la misma que se muestra en la Figura 4.6.

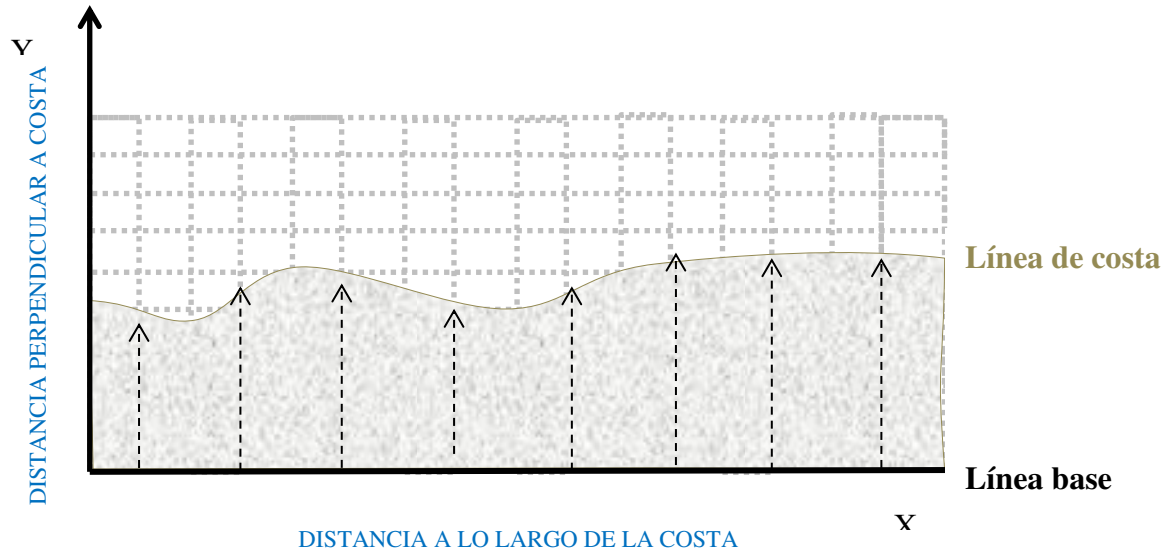


Figura 4.6.- Condiciones iniciales del modelo implementado. Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Condiciones de frontera

Para $x=0$ y para un $x=L$, se considera que estos puntos permanecen constantes (Figura 4.7), lo que equivale a decir que $\partial y / \partial t = 0$.

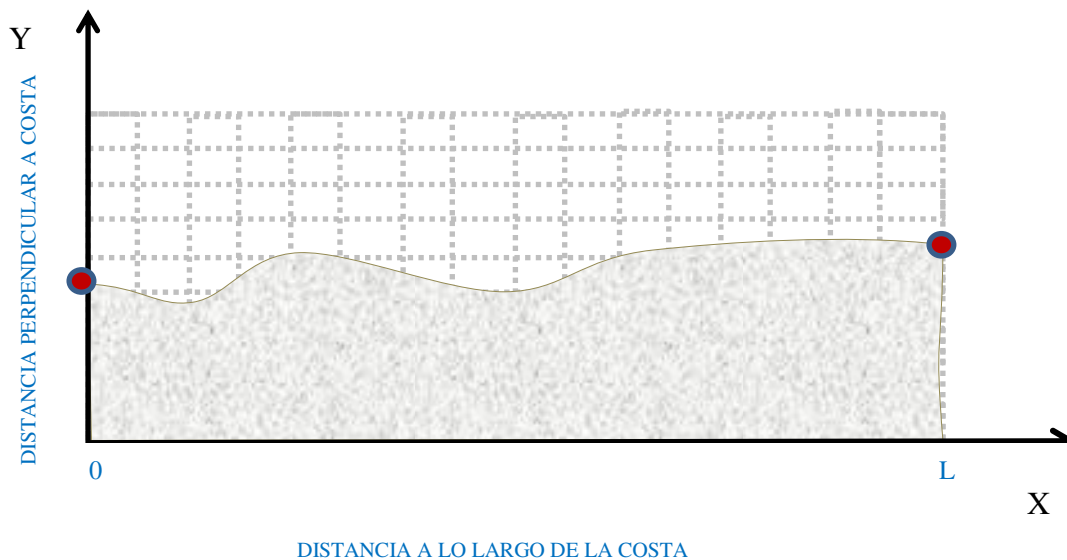


Figura 4.7.- Condiciones de frontera del modelo implementado. Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Esquema de cálculo en el dominio

El esquema de cálculo sobre la grilla irregular muestra en la Figura 4.8 que las posiciones del litoral se denominan $(i-1, i, i+1, i+2 \dots i+n)$ y se encuentran a lo largo del eje X en color azul; así mismo, las tasas de transporte se definen en los límites de las celdas, y se muestran en color marrón.

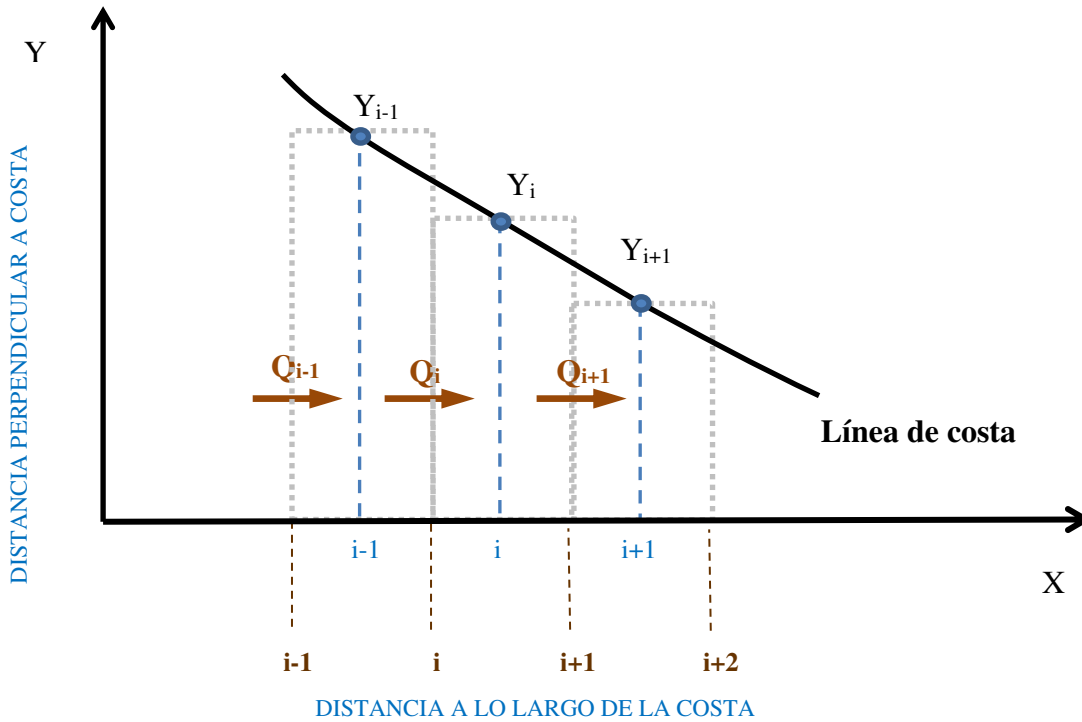


Figura 4.8.- Grilla empleada de diferencias finitas escalonada. Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Obtención de la ecuación gobernante

El esquema numérico empleado es progresivo en el tiempo y regresivo en el espacio, el mismo que se describe en la ecuación (2.9) y se muestra a continuación:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_B + D_C} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad [m/s]$$

Empleando la ecuación (2.3), tenemos:

$$Q = (H^2 \cdot C_g)_b \left(A_1 \cdot \sin 2\alpha_{bs} + A_2 \cdot \cos \alpha_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_b \quad [m^3/año]$$

Si consideramos que la altura de ola en un punto es muy próxima a la del costado, estaríamos diciendo que $\frac{\partial H}{\partial x} \cong 0$

$$Q = (H^2 \cdot C_g)_b (A_1 \cdot \text{sen} 2\alpha_{bs})_b \quad [m^3/s] \quad (4.9)$$

Así mismo, al considerar que:

$$\text{sen} 2\alpha_{bs} \cong 2\alpha_{bs}$$

Y que de acuerdo a la ecuación (4.8):

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - \alpha_s$$

Teniendo en cuenta que:

$$\alpha_s = \text{atan}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) = \frac{\partial y}{\partial x}$$

De esta manera la ecuación (4.9) quedaría:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_B + D_C} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(2H^2 C_g A_1 \left(\alpha_b - \frac{\partial y}{\partial x} \right) \right) - q \right) = 0$$

Si consideramos que $Z = 2H^2 C_g A_1$, ordenando tenemos:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_B + D_C} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(Z \left(\alpha_b - \frac{\partial y}{\partial x} \right) \right) - q \right) = 0$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_B + D_C} \left(Z \left(\frac{\partial \alpha_b}{\partial x} - \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - q \right) = 0$$

Si consideramos $\frac{\partial \alpha_b}{\partial x} = 0$ y si hacemos que:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{Z}{D_B + D_C} \left(-\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{q}{Z} \right) = 0$$

Despejando:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{Z}{D_B + D_C} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{q}{Z} \right) \quad [m/s] \quad (4.10)$$

4.2.6. Esquema numérico de la ecuación de variación de la línea de costa

De la ecuación (4.10) tenemos la primera componente, como una ecuación adelantada:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{y_i^{n+1} - y_i^n}{\Delta t}$$

Y la segunda derivada se expresa en forma de diferencias centradas:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{y_{i-1}^n - 2y_i^n + y_{i+1}^n}{\Delta x^2}$$

Así mismo, si en la ecuación 4.10 reemplazamos:

$$\epsilon = \frac{Z}{D_B + D_C}$$

Reemplazando las representaciones de la derivada temporal y segunda derivada espacial, en la ecuación 4.10 tenemos:

$$\frac{y_i^{n+1} - y_i^n}{\Delta t} = \epsilon \left(\frac{y_{i-1}^n - 2y_i^n + y_{i+1}^n}{\Delta x^2} + \frac{q}{Z} \right) \quad (4.11)$$

Quedando de esta manera la ecuación discretizada de la siguiente manera:

$$y_i^{n+1} = y_i^n + \frac{\epsilon \Delta t}{\Delta x^2} \left(y_{i-1}^n - 2y_i^n + y_{i+1}^n + \frac{q}{Z} \Delta x^2 \right)$$

Así mismo, sabemos que el Número de Courant-Friedrich-Levy (CFL), que controla la estabilidad del modelo, está dado por:

$$CFL = \frac{\epsilon \Delta t}{\Delta x^2}$$

Donde:

ϵ : Es una constante definida por $\frac{2H^2 C_g A_1}{D_B + D_C}$ en unidades $[m^2/s]$

Δt : Es el intervalo de tiempo [s].

Δx : Es el intervalo de espacio [m].

Quedando finalmente la ecuación (4.10) como se muestra:

$$y_i^{n+1} = y_i^n + CFL \left(y_{i-1}^n - 2y_i^n + y_{i+1}^n + \frac{q}{z} \Delta x^2 \right) \quad (4.12)$$

4.2.7. Explicación del modelo de variación de línea de costa

Para la implementación de un modelo de variación de línea de costa, se tomó en consideración las formulaciones del modelo Genesis. El modelo desarrollado es generado en lenguaje de programación fortran, y es realizado bajo la siguiente metodología.

- Se define todos los transportes Q_i en base a la ecuación (2.3), el cual está en función de la altura de ola “H”, la celeridad de grupo en aguas poco profundas “ C_g ”, el ángulo de la ola respecto a la costa “ α_{bs} ” y a la variación en x. Ver Figura 4.9.

$$Q = f(H, C_g, \alpha_{bs}, x)$$

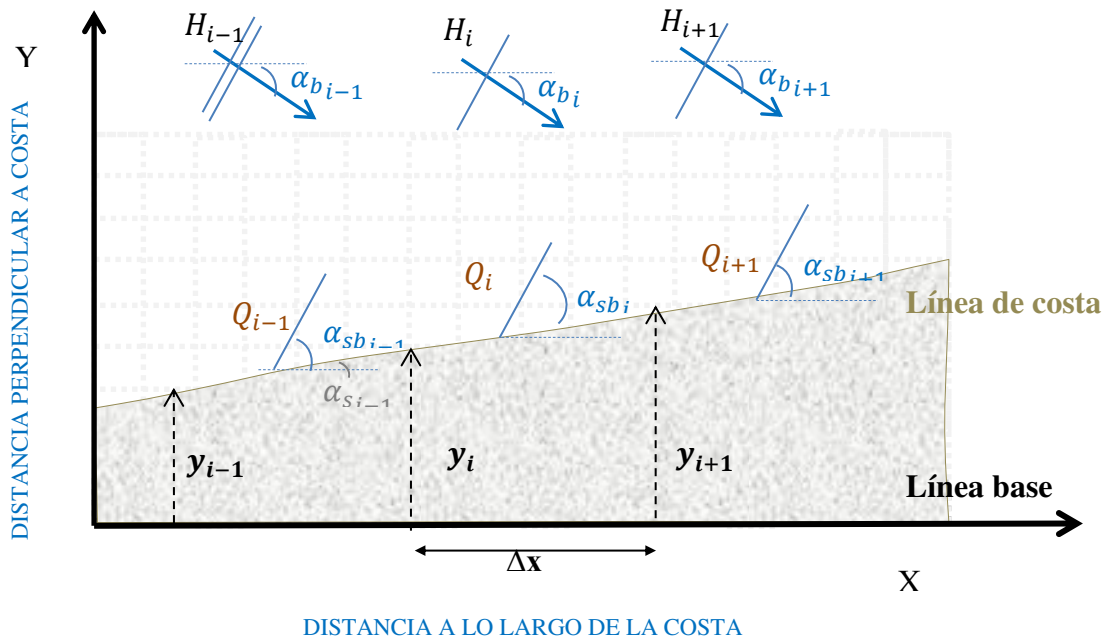


Figura 4.9.- Esquema del cálculo de transporte. Fuente: Elaboración propia

- Se calcula el nuevo valor de “y” de la ecuación (4.12), en función a los transportes calculados “Q”, al “y” inicial, a la variación en x, aportantes de sedimentos “q” y al ancho del río “L”. Ver Figura 4.10.

$$y_{nuevo} = f(y_{inicial}, Q, x, q)$$

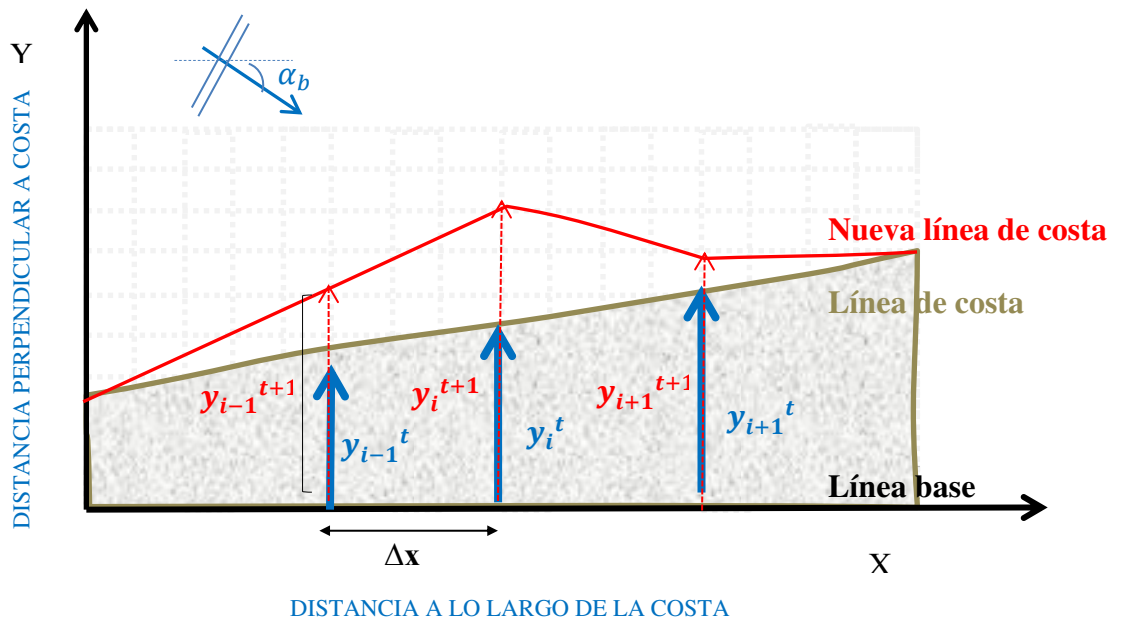


Figura 4.10.- Esquema del cálculo de la distancia “y” que representa erosión o sedimentación. Fuente: Elaboración propia

- c) Se calcula el nuevo ángulo α_s , de la siguiente manera:

$$\alpha_{s_i} = \text{atan}\left(\frac{y_i^{t+1} - y_{i-1}^{t+1}}{\Delta x}\right)$$

- d) Una vez obtenido el nuevo valor del ángulo de la costa procedemos a volver a calcular el paso (a) hasta que este estable.

4.2.8. Validación del modelo de transporte de sedimentos a casos teóricos

Con la finalidad de verificar que el modelo numérico represente adecuadamente las condiciones físicas conocidas en la literatura, se propusieron 3 casos teóricos:

4.2.8.1. Caso 01: Espigón perpendicular a costa (teórico).

Se presenta a continuación una solución simple analítica que permita determinar si el modelo propuesto representa los procesos naturales de sedimentación o erosión. Para esto se propuso el caso teórico de una costa recta y un espigón perpendicular a costa Fredsoe & Deigaard (1992), que se muestra en la Figura 4.11.

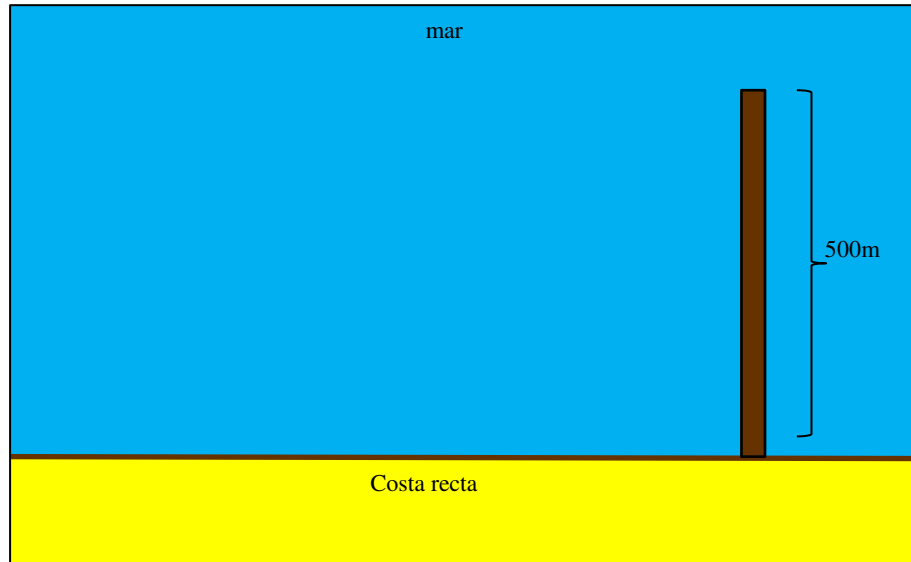


Figura 4.11.- Esquema de un espigón perpendicular a costa. Fuente: Elaboración propia

La solución analítica de un espigón de aproximadamente 500m de largo en una playa recta, forzadas por olas, que se mantendrán constantes, para los tiempos de 0.5, 2.0, 4.0 y 10 años es representada según Fredsoe & Deigaard (1992), de la siguiente manera:

$$Y = Y'_o \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{4K_1 t} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4K_1 t}\right) - x\sqrt{\pi} \left(1 - F\left(\frac{x}{\sqrt{4K_1 t}}\right)\right) \right] \quad [m] \quad (4.13)$$

Donde:

F : Es la función error

Y'_o : 0.15

K_1 : $5.04 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{año}$

El resultado de la solución analítica de este modelo se muestra en la Figura 4.12:

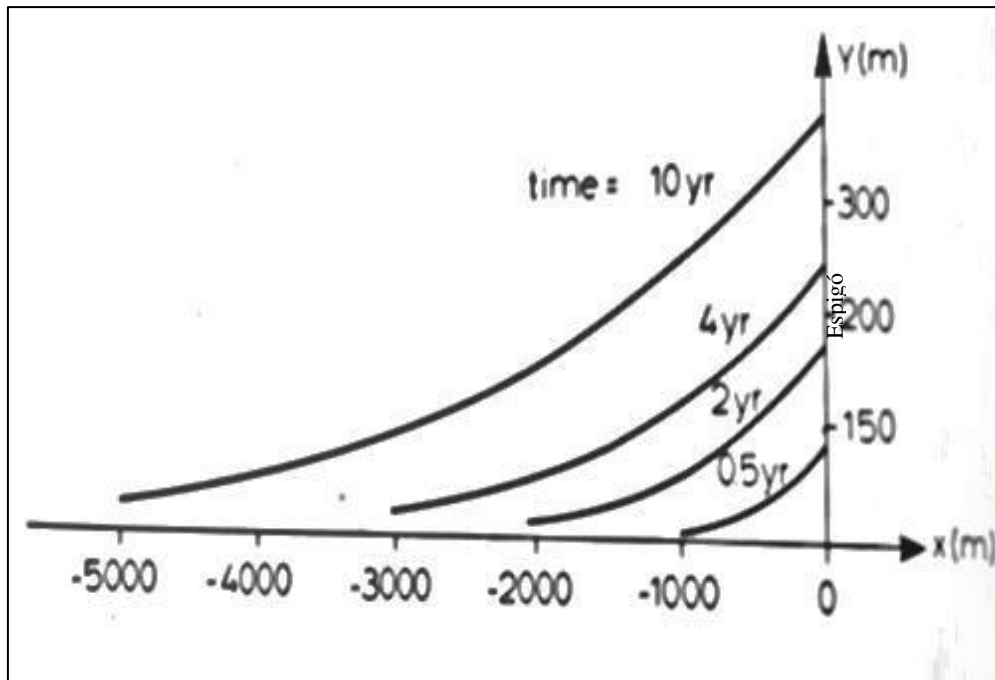


Figura 4.12.- Evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Solución analítica. Fuente: Fredsoe & Deigaard, 1992

Así mismo, las forzantes de olas empleadas para la modelación se muestran a continuación:

- Altura de ola: 2.0m
- Periodo: 7.0 segundos
- Angulo de ola: 340° (dirección oceanográfica)

Con la finalidad de verificar si el modelo desarrollado representa los procesos físicos conocidos, se comparó los resultados del modelo propuesto con el caso desarrollado por Fredsoe & Deigaard (1992). El esquema propuesto para la modelación se describe en la Figura 4.13.

Ecuación gobernante

Ecuación en la frontera

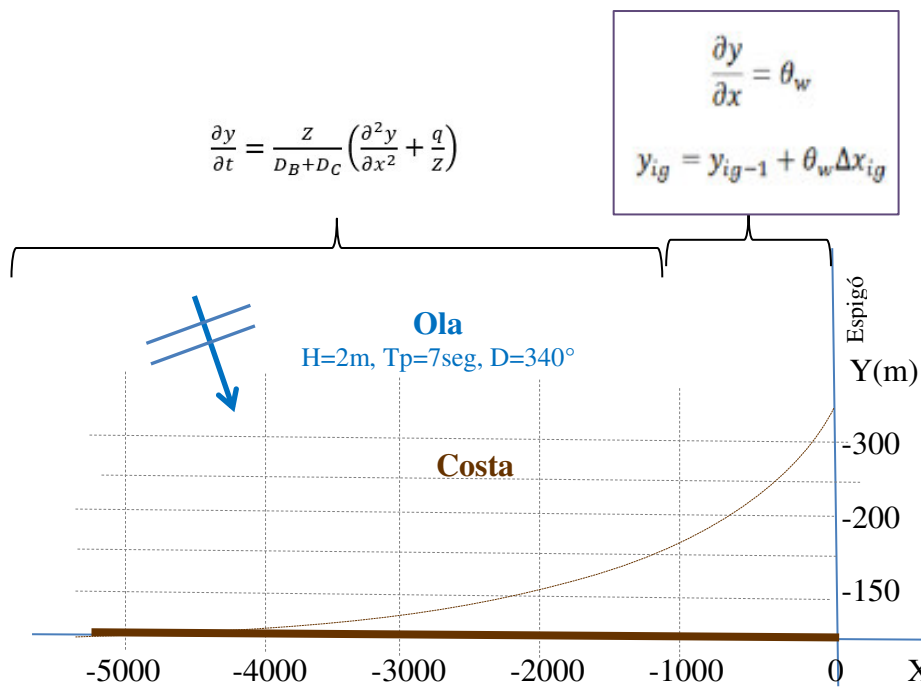


Figura 4.13.- Esquema de la evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Fuente: Fredsoe & Deigaard, 1992

Los resultados de la modelación logran representar la evolución de la línea de costa debida a la inclusión de un espigón, tal como se muestra en la Figura 4.14.

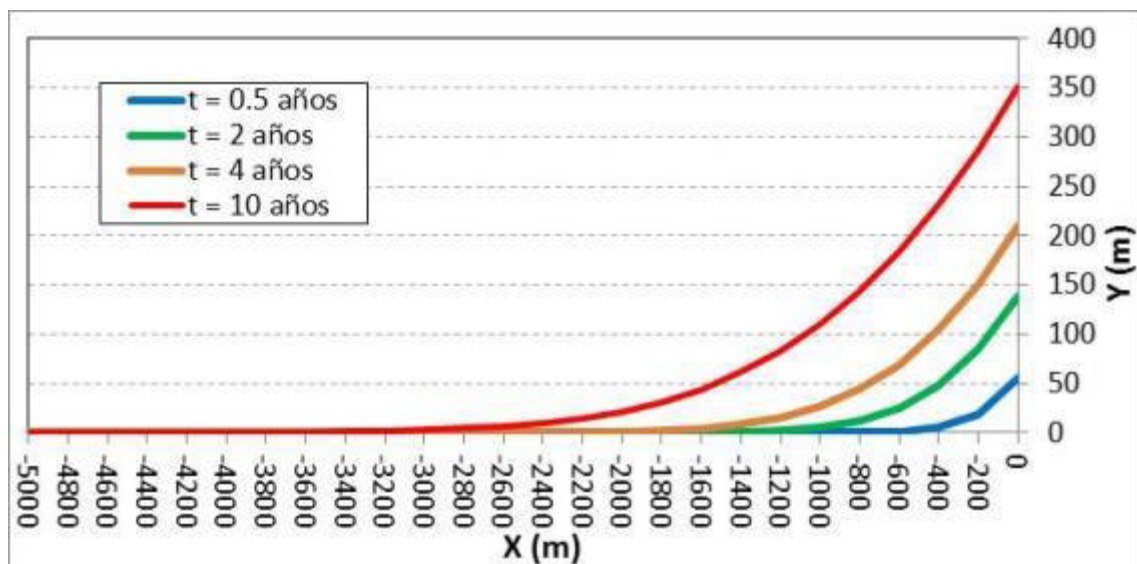


Figura 4.14.- Evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Fuente: Elaboración propia

De los resultados de la evolución de la línea de costa analítico y modelado (Tabla 4.1, Figura 4.15), se muestra que a pesar de no ser las mismas magnitudes, se observa las mismas tendencias de sedimentación, calculándose el grado de correlación entre estas (Tabla 4.2 y Figura 4.16), las mismas que están entre $R=[0.90 \text{ a } 0.93]$.

Tabla 4.1.- Cálculo de la evolución del perfil costero en años entre lo analítico y lo modelado.
Caso 01

Distancia (m)	Analítica				Modelo desarrollado			
	Tiempo (años)				Tiempo (años)			
	0.5	2.0	4.0	10.0	0.5	2.0	4.0	10.0
-5000	0.00	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-4800	0.00	0.00	0.00	18.00	0.00	0.00	0.00	0.02
-4600	0.00	0.00	0.00	24.00	0.00	0.00	0.00	0.03
-4400	0.00	0.00	0.00	30.00	0.00	0.00	0.00	0.05
-4200	0.00	0.00	0.00	36.00	0.00	0.00	0.00	0.09
-4000	0.00	0.00	0.00	45.00	0.00	0.00	0.00	0.16
-3800	0.00	0.00	0.01	50.00	0.00	0.00	0.00	0.29
-3600	0.00	0.00	0.05	60.00	0.00	0.00	0.00	0.50
-3400	0.00	0.00	10.00	66.00	0.00	0.00	0.00	0.86
-3200	0.00	0.00	15.00	72.00	0.00	0.00	0.00	1.46
-3000	0.00	0.00	18.00	80.00	0.00	0.00	0.01	2.41
-2800	0.00	0.01	20.00	90.00	0.00	0.00	0.03	3.90
-2600	0.00	0.00	25.00	100.00	0.00	0.00	0.07	6.17
-2400	0.00	0.00	30.00	110.00	0.00	0.00	0.18	9.56
-2200	0.00	5.00	40.00	126.00	0.00	0.01	0.43	14.48
-2000	0.00	10.00	50.00	140.00	0.00	0.02	0.96	21.46
-1800	0.00	15.00	60.00	150.00	0.00	0.07	2.05	31.09
-1600	0.00	20.00	70.00	170.00	0.00	0.24	4.18	44.04
-1400	0.00	25.00	80.00	183.00	0.00	0.71	8.13	61.05
-1200	0.00	30.00	90.00	200.00	0.00	1.98	15.01	82.84
-1000	0.01	40.00	100.00	220.00	0.02	5.04	26.31	110.14
-800	10.00	50.00	120.00	240.00	0.16	11.78	43.75	143.65
-600	20.00	70.00	140.00	270.00	0.94	25.05	69.18	183.99
-400	30.00	100.00	160.00	300.00	4.67	48.38	104.36	231.76
-200	50.00	130.00	190.00	320.00	18.39	85.36	150.87	287.46
0	80.00	160.00	220.00	350.00	55.19	139.09	210.01	351.53

Fuente: Elaboración propia

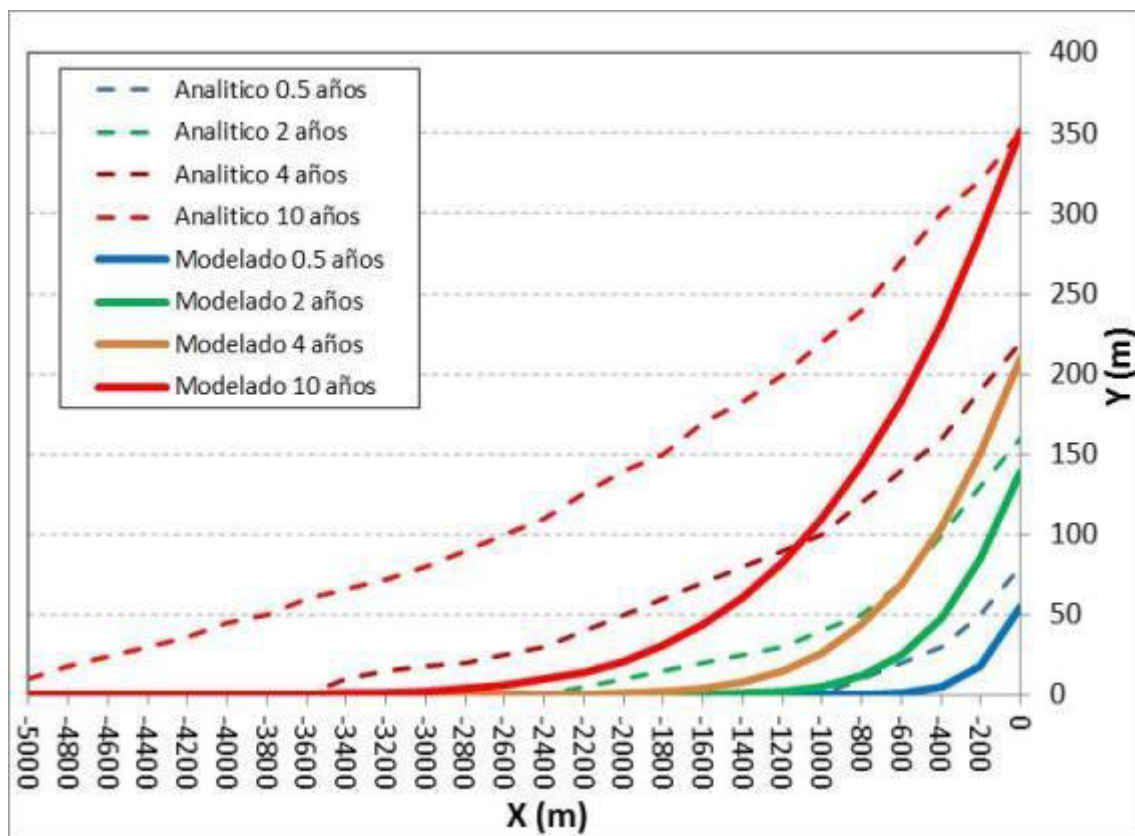


Figura 4.15.- Evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Fuente: Elaboración propia, elaborada de la Tabla 4.1 .

Tabla 4.2.- Correlación entre lo analítico y observado por tiempos de simulación

Tiempo (años)	Correlación (R)
0.5	0.92
2	0.93
4	0.90
10	0.92

Fuente: Elaboración propia

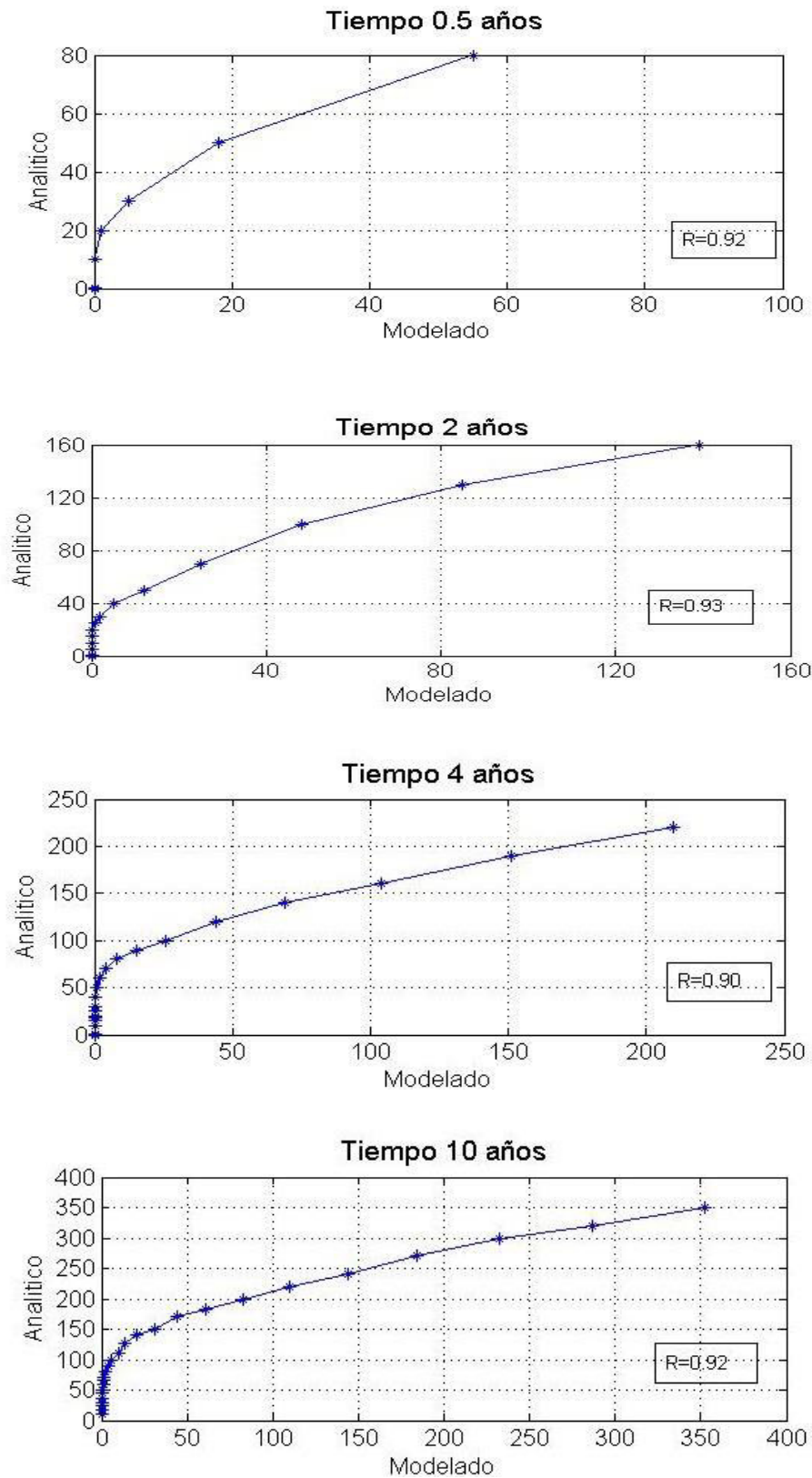


Figura 4.16.- Correlación de los resultados del modelo y la solución analítica para diferentes tiempos. Fuente: Elaboración propia.

4.2.8.2. Caso 02: Rompeolas paralelo a costa

Se considera un perfil costero recto y un rompeolas paralelo a costa de aproximadamente 200m de longitud y ubicado a 250m de costa. Las condiciones de oleaje se mantuvieron constantes en altura de ola de 1.5m, periodo 6 segundos y dirección 0° (convención oceanográfica) para un periodo de 6 meses. Ver Figura 4.17.

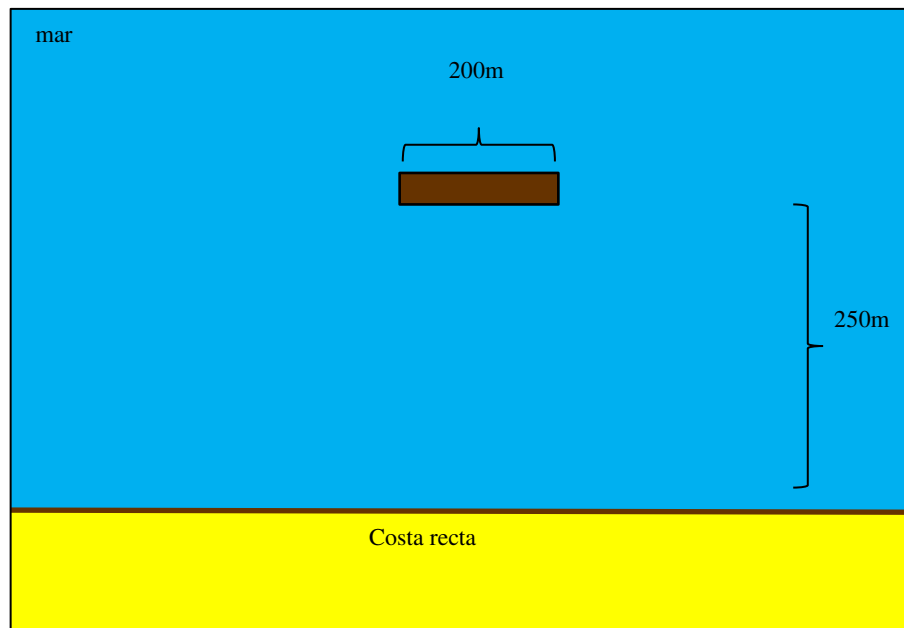


Figura 4.17.- Esquema de un espigón paralelo a costa. Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de verificar si el modelo desarrollado representa los procesos físicos conocidos, se comparó los resultados del modelo propuesto con el caso desarrollado por Hanson & Kraus(1989), en la que se muestra un ejemplo de la evolución del perfil costero teniendo en cuenta las dimensiones de la estructura propuesta y distancia de costa, el mismo que servirá como medio de comparación del modelo desarrollado (Figura 4.18).

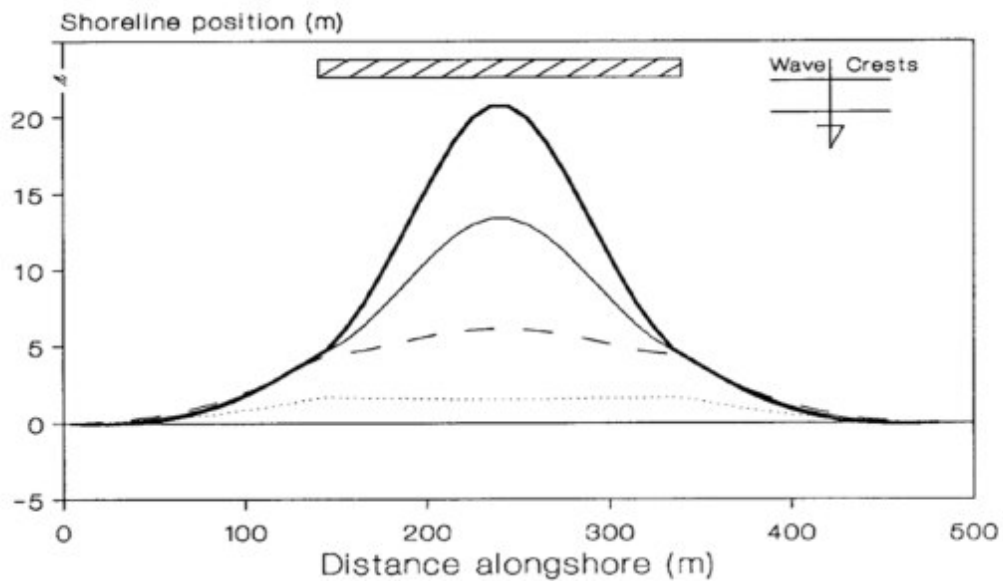


Figura 4.18.- Evolución del perfil costero con un rompeolas paralelo a costa. Solución analítica. Fuente: Hanson & Kraus, 1989.

El esquema propuesto para la modelación se describe en la Figura 4.19.

Ecuaciones gobernantes

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{z}{D_B + D_C} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{q}{z} \right) \quad \boxed{\frac{\partial y}{\partial t} = \alpha_B - \frac{Q}{2H^2 C_g A_1}} \quad \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{z}{D_B + D_C} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{q}{z} \right)$$

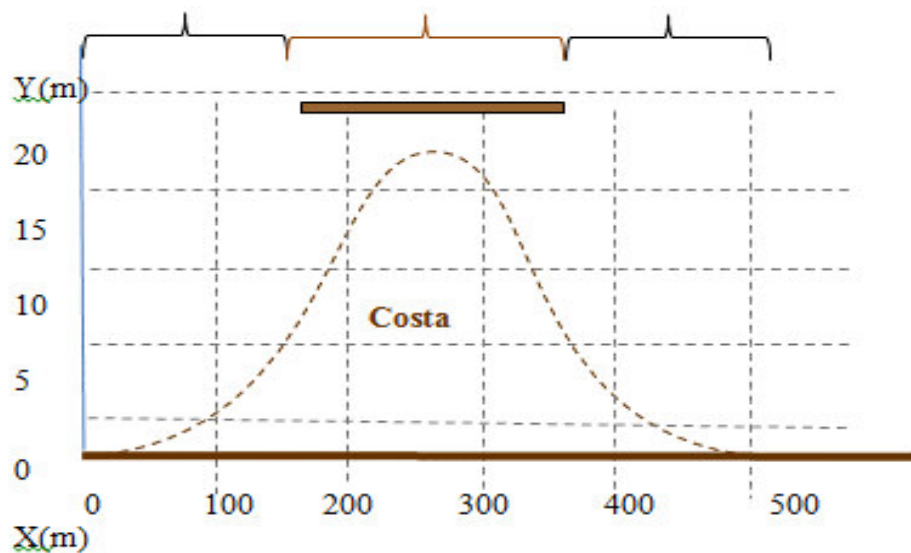


Figura 4.19.- Esquema de la evolución del perfil costero con un rompeolas paralelo a costa.

Fuente: Hanson & Kraus, 1989

Las condiciones oceanográficas de olas el periodo de 6 segundos y la altura y dirección de ola tal como se observa en la Figura 4.20.

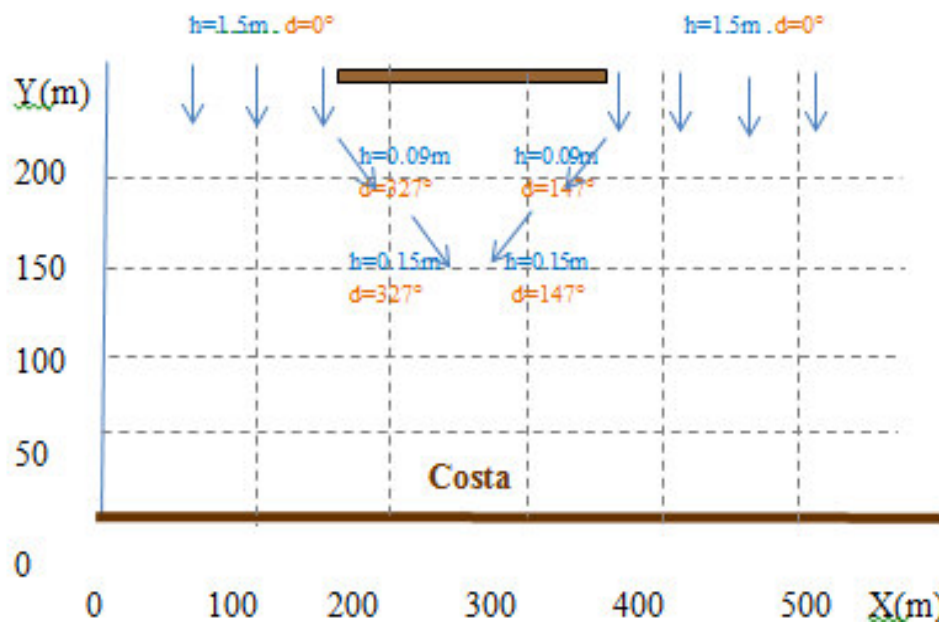


Figura 4.20.- Esquema de las alturas y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

De estos 2 resultados se muestra que a pesar de no ser las mismas magnitudes, se observa las mismas tendencias de sedimentación, observándose que para 6 meses de simulación en el modelo (Figura 4.21) se observa la misma tendencia de evolución del perfil costero, observándose que de forma general que el modelo desarrollado estaría ligeramente sobreestimando los cálculos analíticos en algunos puntos, los mismos que se muestran en la Figura 4.22 y Tabla 4.3.

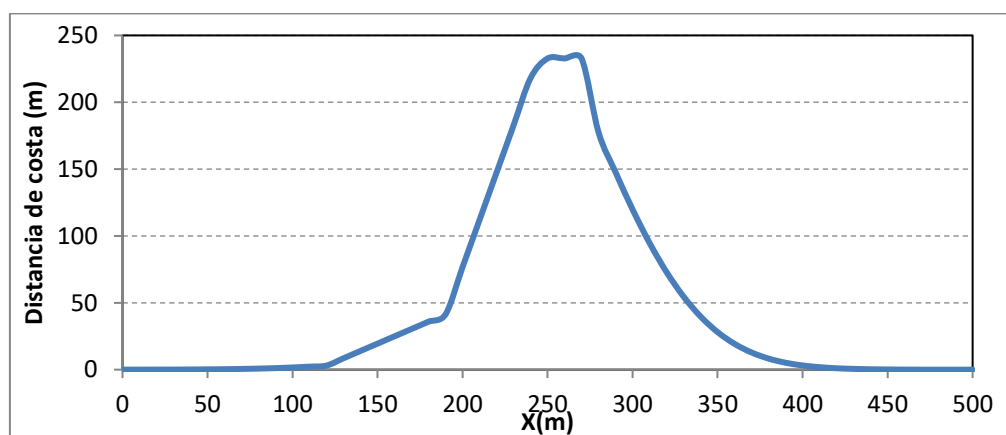


Figura 4.21.- Evolución del perfil costero con un rompeolas paralelo a costa. Fuente:
Elaboración propia

Tabla 4.3.- Cálculo de la evolución del perfil costero en años entre lo analítico y lo modelado. Caso 02

Distancia de costa		
X(m)	Analítico	Modelado
0	0	0.019
10	0	0.0285
20	0	0.057
30	0	0.0855
40	0	0.1425
50	0	0.228
60	5	0.3515
70	10	0.5415
80	15	0.798
90	20	1.1495
100	23	1.634
110	27	2.261
120	30	3.0685
130	35	8.5405
140	40	14.0125
150	45	19.475
160	60	24.9565
170	70	30.419
180	90	35.891
190	120	41.363
200	170	76.6935
210	190	112.0335
220	200	147.3735
230	210	182.704
240	210	218.044
250	210	232.75

Distancia de costa		
X(m)	Analítico	Modelado
260	200	232.75
270	185	232.75
280	170	177.4885
290	140	147.6585
300	110	119.833
310	80	94.7625
320	60	72.96
330	40	54.6345
340	30	39.7575
350	25	28.101
360	22	19.285
370	18	12.8345
380	15	8.284
390	12	5.187
400	7	3.1445
410	3	1.843
420	0	1.045
430	0	0.5795
440	0	0.304
450	0	0.152
460	0	0.057
470	0	0
480	0	0
490	0	0
500	0	0

Fuente: Elaboración propia

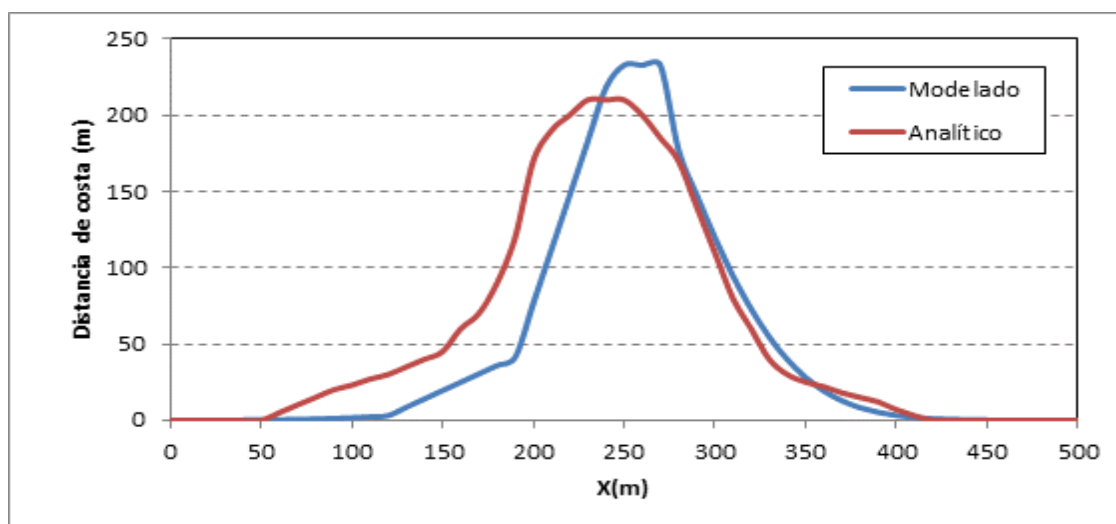


Figura 4.22.- Evolución del perfil costero con un rompeolas perpendicular a costa. Caso 02.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.22 se muestra la sobre posición de la evolución del perfil costero analítico y modelado, observándose que el modelo mantiene la tendencia de la sedimentación, así mismo, en la Figura 4.23 se muestra la correlación obtenida de la comparación de las dos series, observándose que la correlación existente es de 0.99.

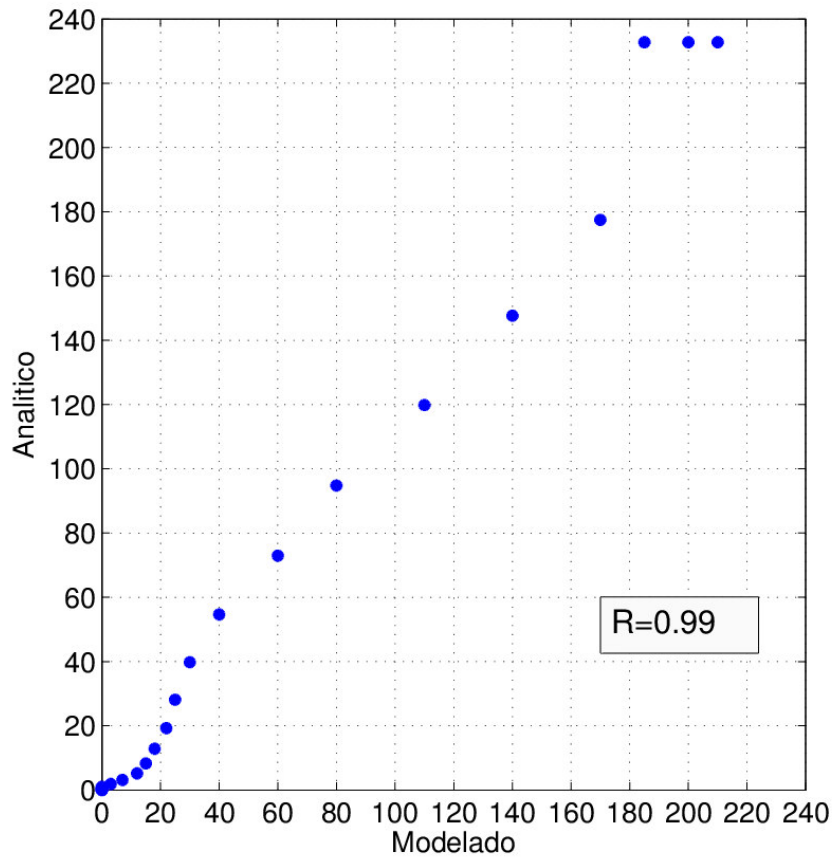


Figura 4.23.- Correlación entre los sedimentos del modelo y la solución analítica. Fuente:
Elaboración propia

4.2.8.3. Caso 03: Influencia de una fuente de sedimentos en una playa recta

Con la finalidad de observar la evolución del perfil costero debido a una descarga de sedimentos en costa (Figura 4.24), se realizó un caso que permita cuantificar si el modelo representa adecuadamente los procesos costeros, para esto, se considera un perfil costero recto y una descarga de sedimentos en costa constante de $Q=0.01\text{m}^3/\text{s}$. Las condiciones de oleaje se mantuvieron constantes en altura de ola de 2.5m, periodo 7.5 segundos y dirección 340° (convención oceanográfica) para una corrida de 0.5, 1, 2, 5 y 10 años.

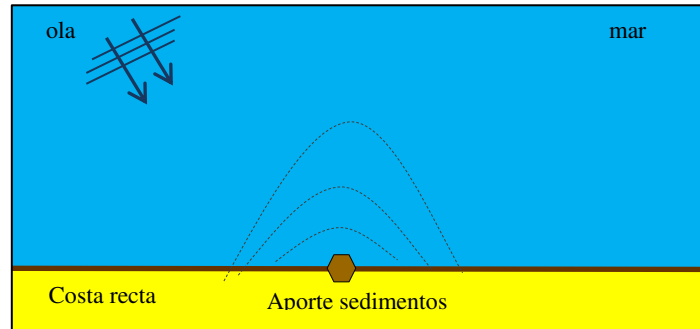


Figura 4.24.- Evolución del perfil costero para una playa recta y descarga de sedimentos. Fuente: Elaboración propia

El esquema propuesto para la modelación se describe en la Figura 4.25.

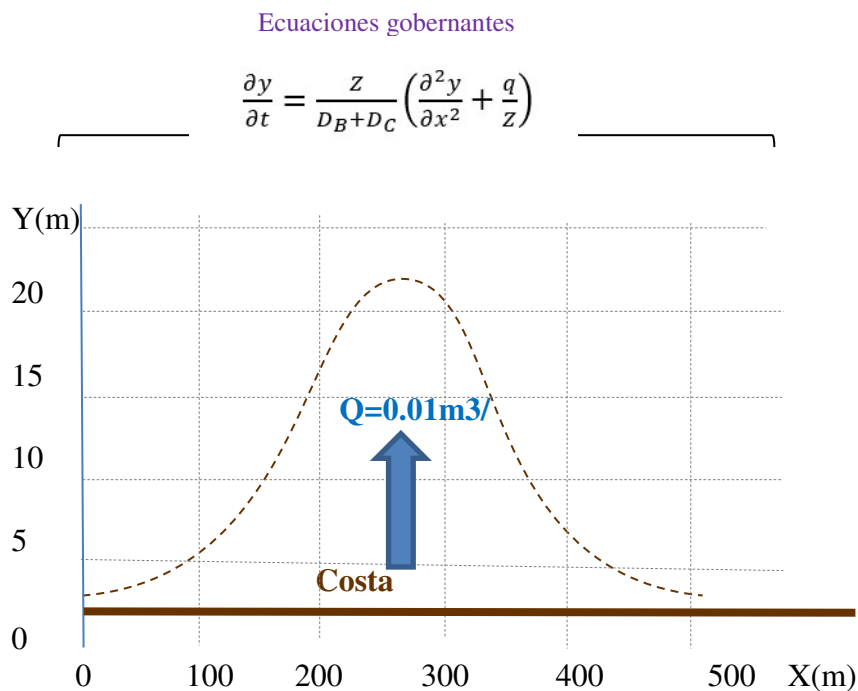


Figura 4.25.- Esquema de la evolución del perfil costero debido a una descarga de sedimentos en costa. Fuente: Elaboración propia

El resultado de la modelación nos indica que el modelo representa adecuadamente el proceso de sedimentación producto de la inclusión de una descarga de sedimentos en costa, observándose en la Figura 4.26, la evolución del perfil costero en el tiempo, lográndose un incremento del perfil costero que inicia en el punto de descarga de sedimentos.

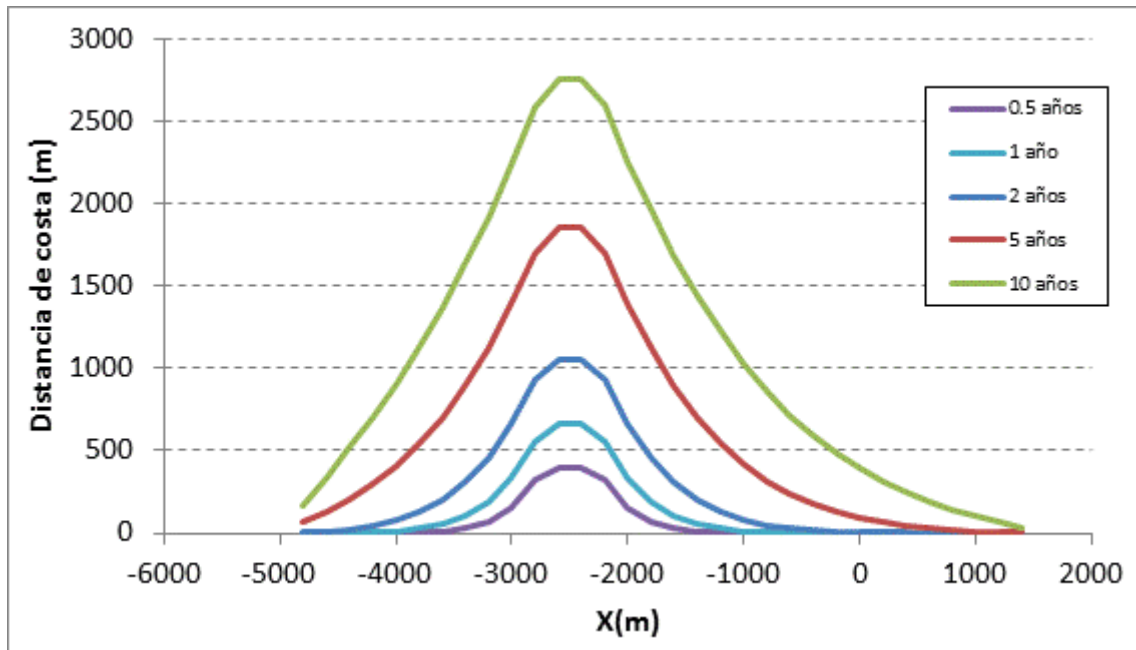


Figura 4.26.- Evolución del perfil costero con una descarga de sedimentos en costa. Modelo desarrollado. Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V.- RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se van a mostrar y describir todos los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis.

5.1. Clima marítimo de olas

Para el estudio se toman en cuenta las siguientes consideraciones en la modelación:

- Se considera que el oleaje ya salió de su zona de generación.
- Se considera que la información de olas ingresadas en las fronteras es constante a lo largo del límite de la grilla.
- La simulación es de forma estacionaria.
- El paso de datos entre una malla a otra es a través de una interpolación lineal simple.

5.1.1. Configuración del modelo

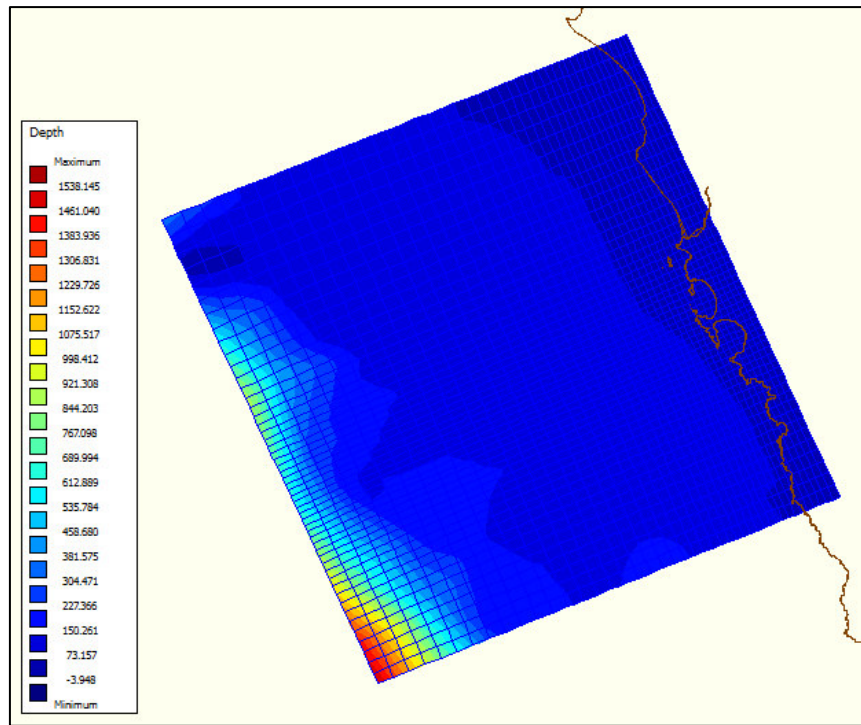
5.1.1.1. Grilla de cálculo

Para la generación de la grilla de cálculo que se presenta en la Figura 5.1, donde se empleó el programa RGFGRID y QUICKIN del modelo DELFT3D, generándose 2 mallas, las mismas que se describen en la Tabla 5.1.

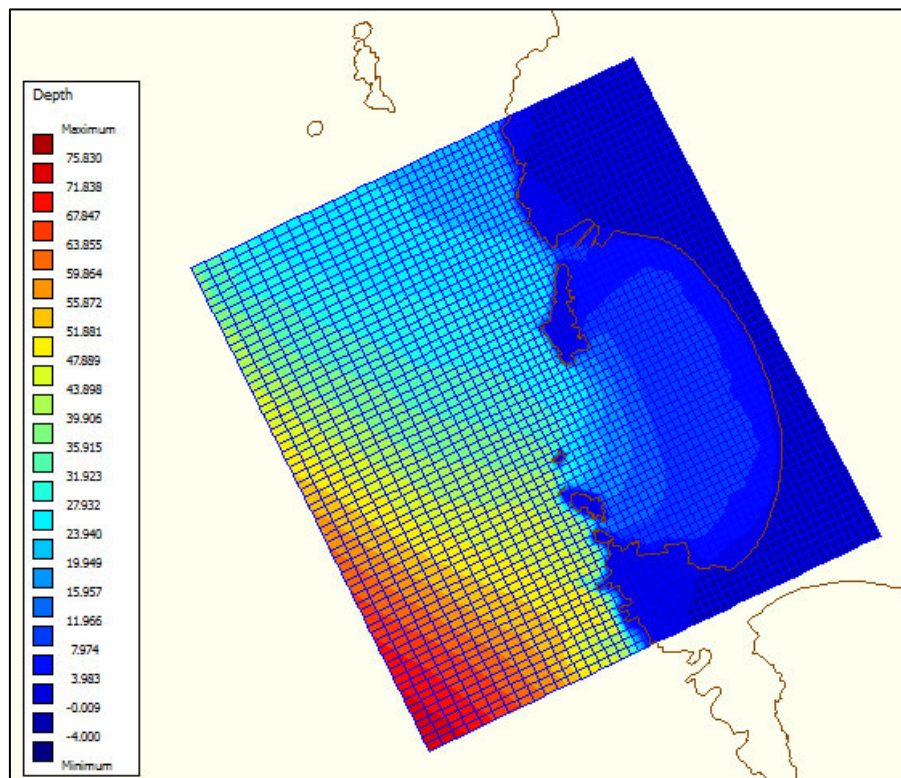
Tabla 5.1.- Características de la grilla de cálculo empleadas en la modelación

Malla de calculo	Detalle	M	N
Coarse	Malla para aguas profundas	52	44
Fine	Malla para aguas poco profundas	65	52

Fuente: Elaboración propia



(a)



(b)

Figura 5.1.- Interpolación de la batimétrica a la grilla de cálculo. (a) Malla Coarse y (b) Malla Fine. Fuente: Elaboración propia

Un compilado de las 2 mallas puede observarse en la Tabla 5.2 y Tabla 5.3, observándose que la malla Coarse es mucho más gruesa que la malla Fine. Así mismo, las mallas generadas tienen la característica de ser una malla irregular, ya que se le ha dado mayor resolución al área que comprende a la bahía de Ferrol a fin de representar con mejor detalle los procesos a modelar.

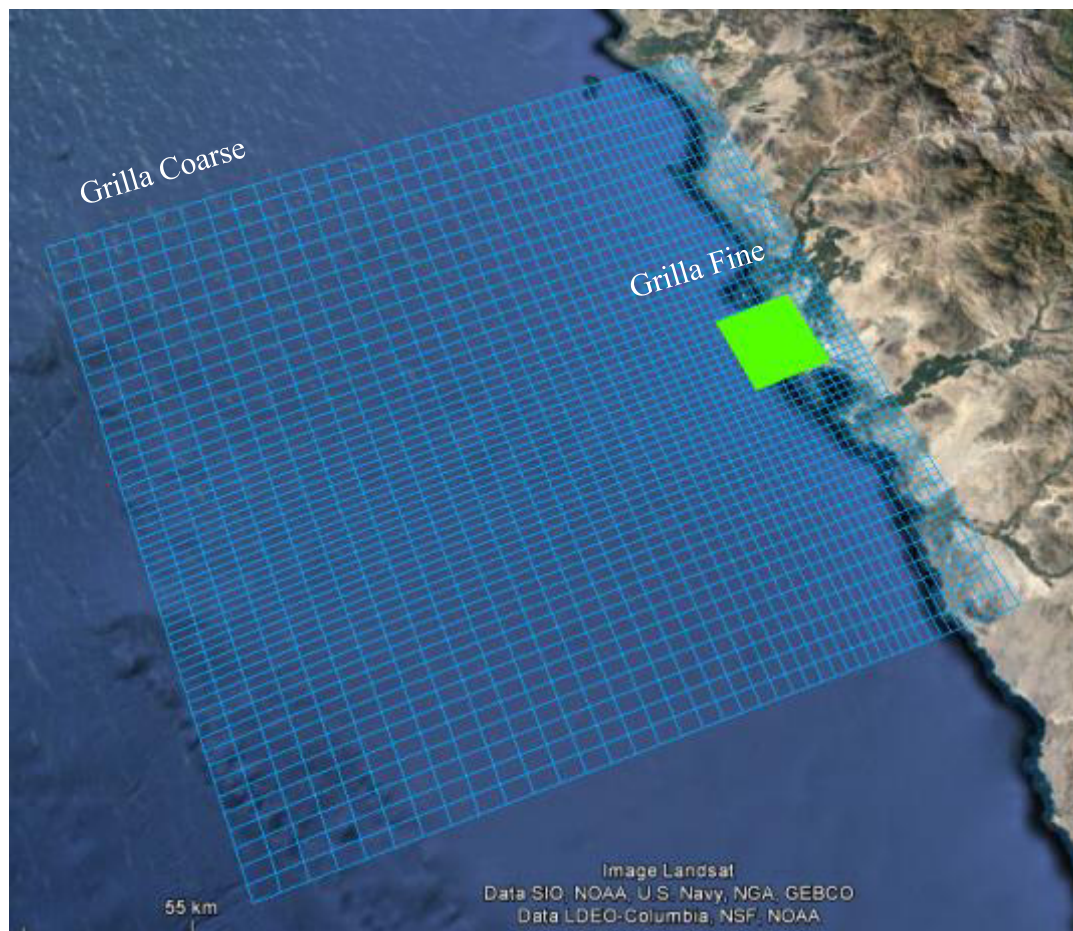


Figura 5.2.- Grilla de cálculo para la modelación de olas. Fuente: Elaboración propia

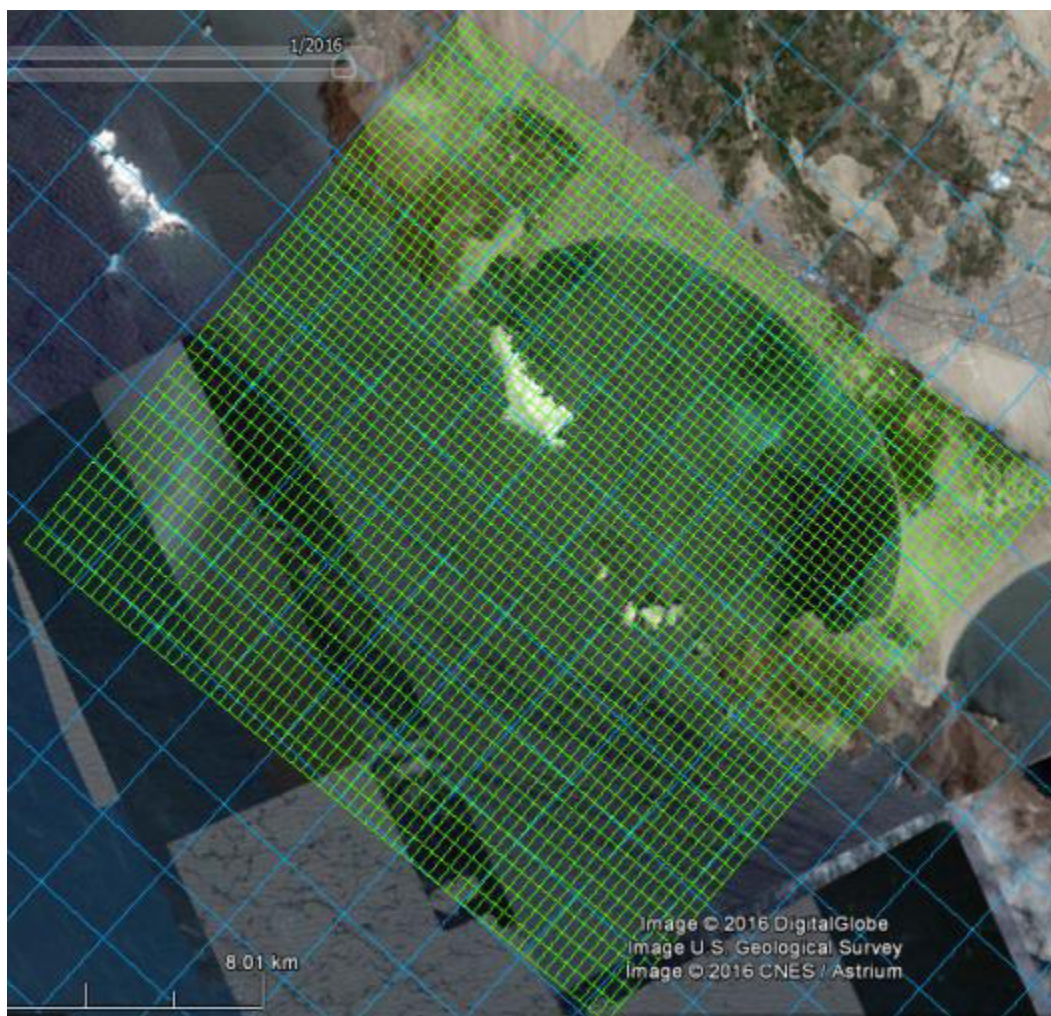


Figura 5.3.- Detalle de la malla fine. Fuente: Elaboración propia

5.1.1.2. Casos a ser mostrados

La información de 30 años de olas del modelo Wave Watch es propagada hasta costa mediante las 3 mallas definidas, con lo que se obtiene las series temporales de oleaje en zonas costeras, mediante la propagación de olas de aguas profundas a poco profundas realizadas con el modelo DELFT3D en el módulo Wave.

Asimismo con la finalidad de representar la distribución espacial del oleaje en aguas costeras se han seleccionado unos eventos representativos de las condiciones normales (predominantes), para esto se ha tomado en consideración la probabilidad acumulada de altura de olas en aguas profundas (Figura 5.4) donde se observa que el 50% de todos los datos corresponden a alturas de olas menores a 1.95m, por lo que se puede considerar que

la altura de ola predominante es 1.95m de altura. Para el caso de las bravezas de mar, se ha empleado el gráfico donde se relacionan la altura, periodo y dirección en aguas profundas (Figura 5.5), finalmente se elabora la Tabla 5.2, se muestran en detalle las condiciones de olas a ser mostradas en la representación espacial del proceso de propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa.

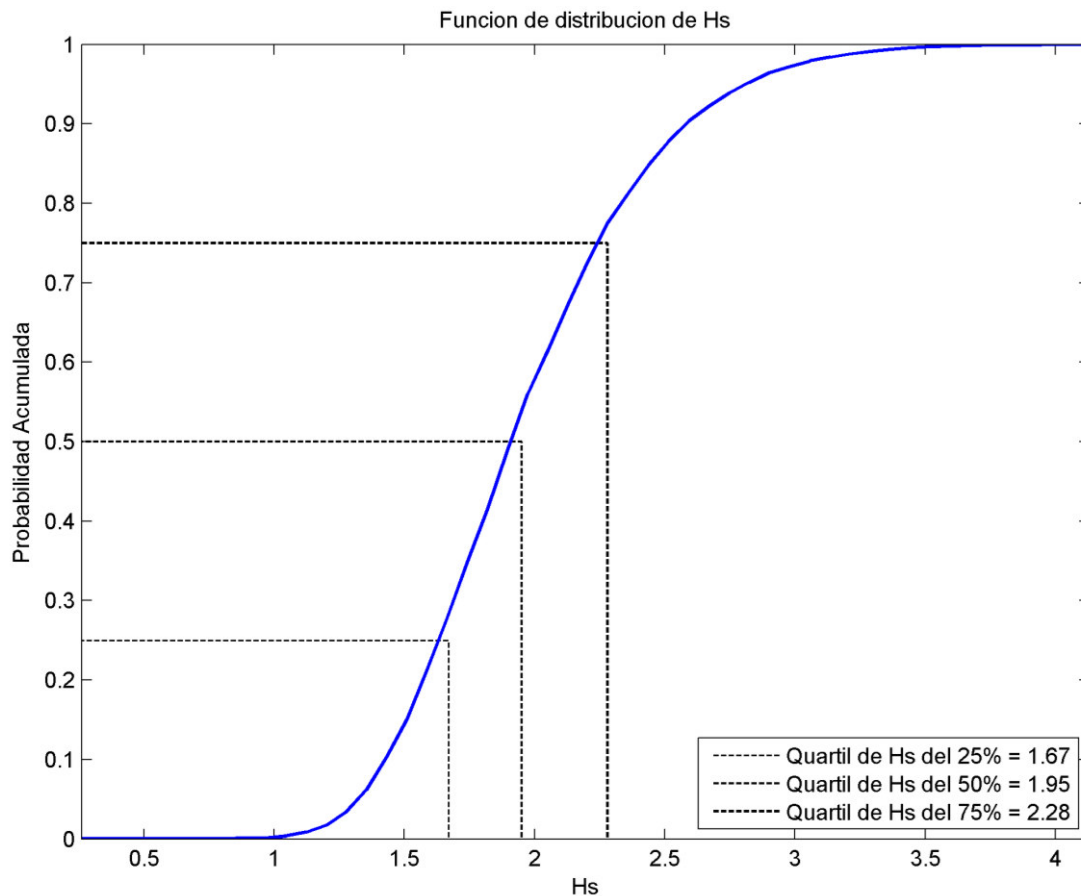


Figura 5.4.- Probabilidad acumulada de la altura de ola en (m). Fuente: Elaboración propia

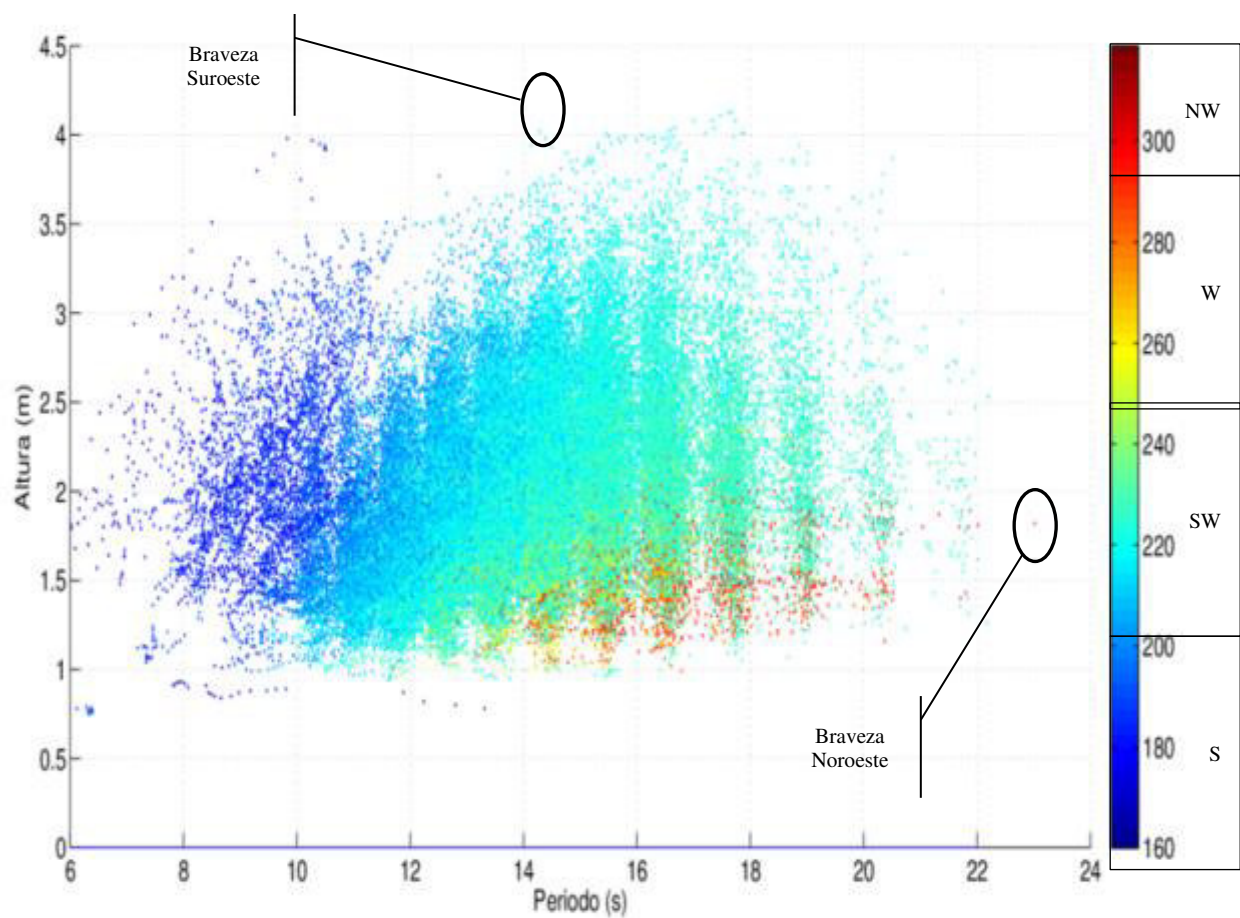


Figura 5.5.- Relación de variables altura, periodo y dirección. Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2.- Casos representativos de olas en aguas profundas

Fecha	Aguas en aguas profundas			Descripción
	Hs (m)	Dirección (°)	Periodo (s)	
30/Dic/1981 21:00	1.95	220.0	14.00	Condición predominante
14/Jul/1992 06:00	4.0	217.5	14.30	Braveza del Suroeste
03/Feb/1998 09:00	1.80	293.0	22.00	Braveza del Noroeste

Fuente: Elaboración propia

5.1.1.3. Puntos de control de clima de olas

En base a los resultados del modelamiento realizado de aguas profundas a aguas intermedias, se ha extraído varios puntos de extracción de información de olas en aguas poco profundas y cercano a la zona de estudio, para que puedan ser empleados en la modelación de transporte de sedimentos. La ubicación de los puntos de extracción de olas se muestra en la Figura 5.6 y Tabla 5.3.



Figura 5.6.- Estaciones de puntos de control definidos en la bahía. Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.3.- Ubicación de las estaciones de puntos de control definidos en la bahía

Estaciones	Latitud	Longitud
Ológrafo	9.128708° Sur	78.604386° Oeste
P1	9.159939° Sur	78.578868° Oeste
P2	9.156037° Sur	78.573738 ° Oeste
P3	9.152723° Sur	78.571469° Oeste
P4	9.149163° Sur	78.567601° Oeste
P5	9.145401° Sur	78.565790° Oeste
P6	9.141851° Sur	78.563413° Oeste
P7	9.137066° Sur	78.562645° Oeste
P8	9.132399° Sur	78.562213° Oeste
P9	9.128639° Sur	78.562130° Oeste
P10	9.123758° Sur	78.564564° Oeste
P11	9.117406° Sur	78.567471 ° Oeste
P12	9.111845° Sur	78.569800° Oeste
P13	9.106624° Sur	78.572809° Oeste
P14	9.101858° Sur	78.575474° Oeste
P15	9.096876° Sur	78.578721° Oeste
P16	9.091784° Sur	78.583674° Oeste
P17	9.088284° Sur	78.587253° Oeste
P18	9.085328° Sur	78.588528° Oeste
P19	9.081723° Sur	78.594162° Oeste
P20	9.176789° Sur	78.629958° Oeste
P21	9.132478° Sur	78.643993° Oeste
P22	9.096656° Sur	78.648693° Oeste

Fuente: Elaboración propia

5.1.1.4. Flujo medio de energía

El flujo medio de energía es el flujo promedio de todas las condiciones de oleaje que se pueden dar en el área de estudio, el cual está dado por el vector $\overline{F_M}$, el cual es el flujo de energía de todos los oleajes, el cual se representa como:

$$\overline{F_M} = (F_x i + F_y j)$$

El módulo del vector flujo medio es definido como:

$$|\overline{F_M}| = \sqrt{F_{MX}^2 + F_{MY}^2}$$

Donde la energía en el eje X es dada como:

$$F_{MY} = \sum_N^{i=1} \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot C_g \cdot \cos \theta_i$$

La energía en el eje Y es dado por:

$$F_{MX} = \sum_N^{i=1} \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot C_g \cdot \sin \theta_i$$

La dirección del flujo medio de energía se expresa de la siguiente manera:

$$\theta_M = a \tan \left(\frac{F_{MY}}{F_{MX}} \right)$$

Los resultados de estos cálculos permitirán obtener un dato representativo de altura, dirección y periodo de las condiciones dinámicas en el área de proyecto.

Esta información será determinada para cada punto de control determinado anteriormente.

5.1.2. Resultados del clima marítimo

5.1.2.1. Distribución espacial

El resultado de la modelación de olas se representa en la Figura 5.7, observándose que las condiciones predominantes de olas en la bahía es aproximadamente 2.0m de altura de ola, con dirección Suroeste, y que al ingresar a la bocana de acceso a la bahía Ferrol, cambian de dirección y altura de olas (procesos de refracción y difracción de olas), siendo la zona más impactada la zona norte y centro de la bahía con alturas de hasta 1.0m, mientras que la zona sur presentan alturas de olas menores a 0.5m.

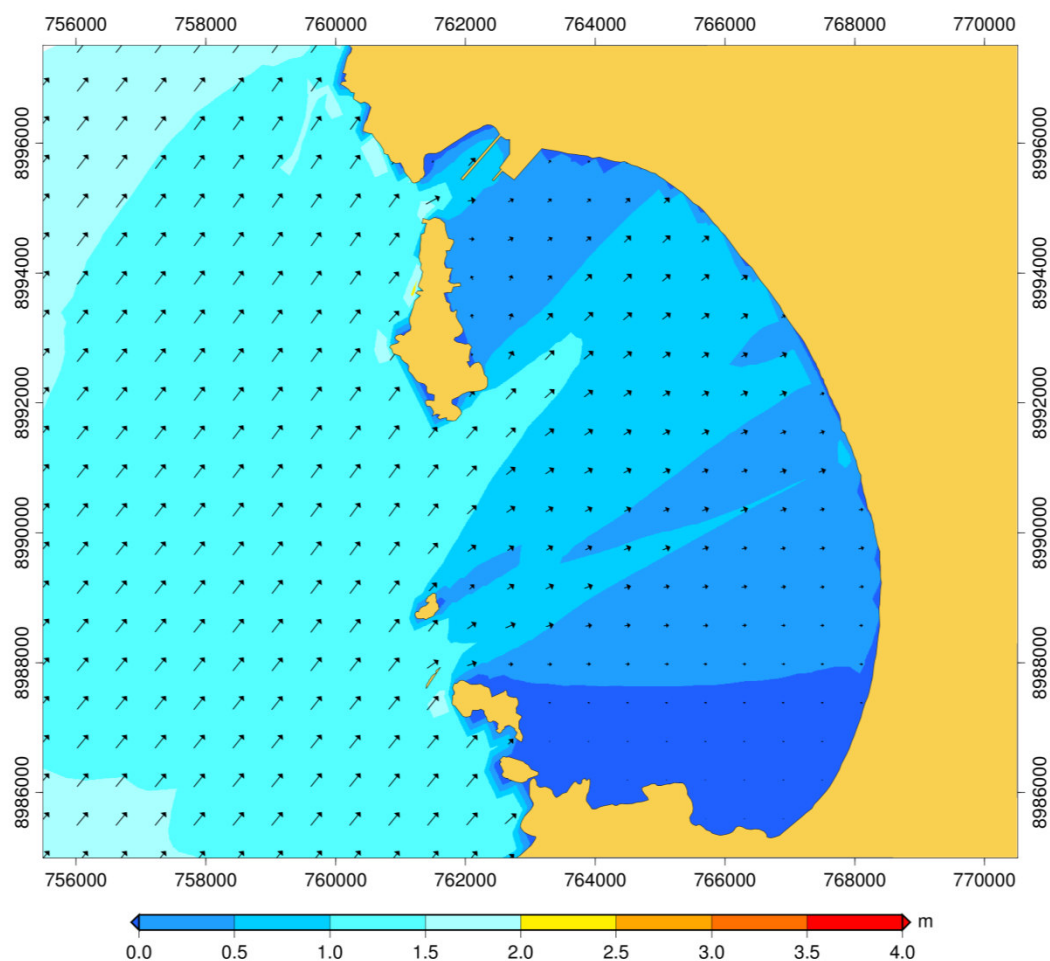


Figura 5.7.- Modelación de olas en condiciones predominantes. $H_s=1.95\text{m}$, $\text{Dir}=220^\circ$ y $T_p=14\text{s}$. Fuente: Elaboración propia

En condiciones de braveza de mar de dirección suroeste, se observa que las máximas alturas de olas, se presentan fuera de la bahía con alturas de 3.5m, los mismos que al ingresar a la bahía cambian de dirección y alturas, con alturas máximas de hasta 2.0m en la zona norte y centro de la bahía, mientras que en la zona sur se presentan alturas de olas menores a 1.0m.

Ver Figura 5.8

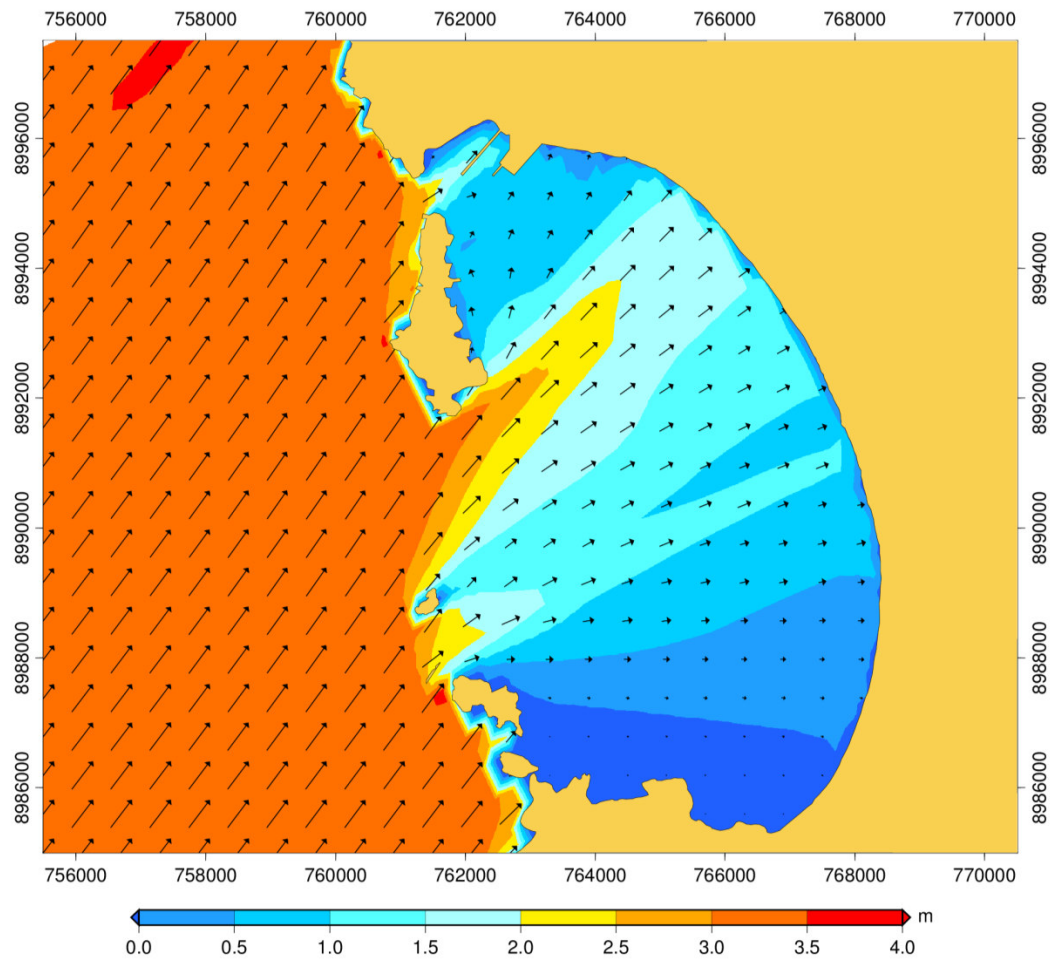


Figura 5.8.- Modelación de olas en condiciones de braveza de mar de dirección suroeste.

Hs=4.00m, Dir=217.5° y Tp=14.3s. Fuente: Elaboración propia

En condiciones de braveza de mar de dirección noroeste, se observa que las máximas alturas de olas, se presentan fuera de la bahía y en la zona norte y centro de la bahía, con alturas hasta 1.0m, mientras que la zona sur, presenta alturas menores a 0.5m. Ver Figura 5.9.

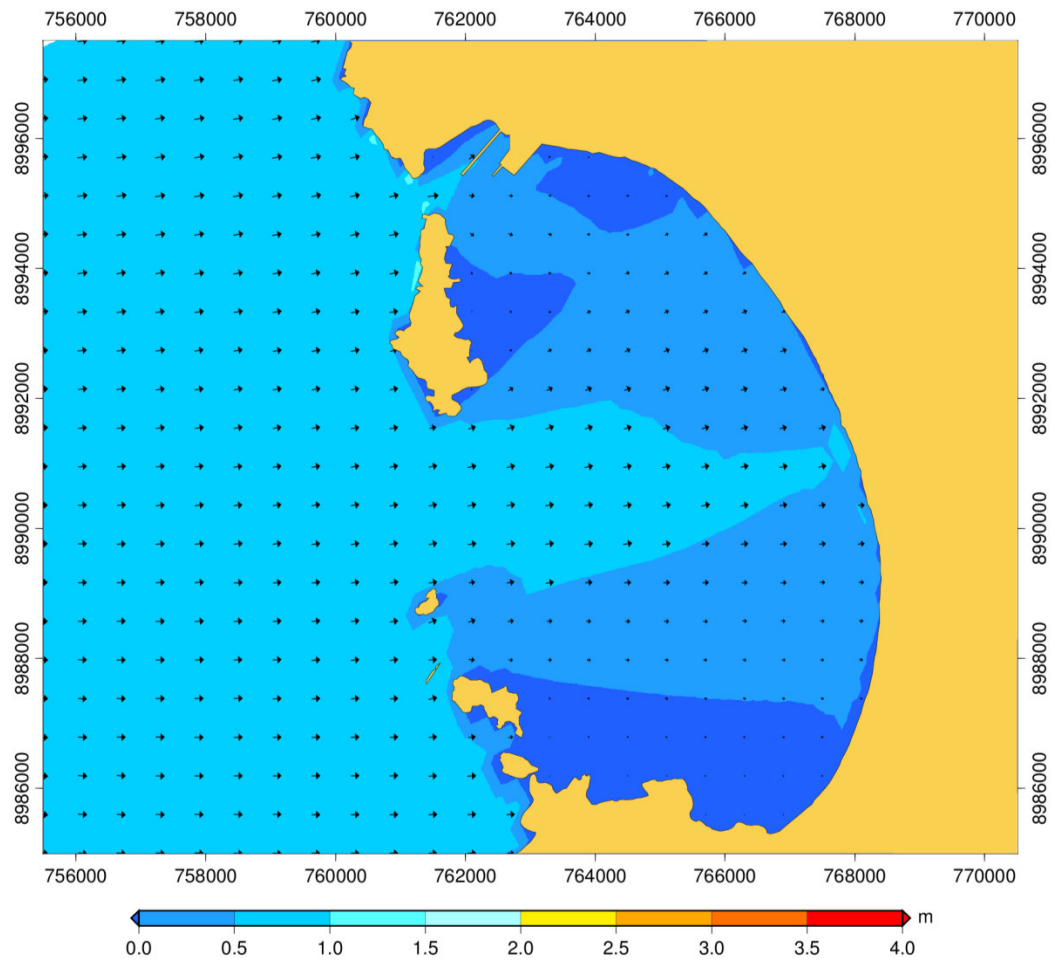


Figura 5.9.- Modelación de olas en condiciones de braveza de mar de dirección noroeste. $H_s=1.80\text{m}$, $\text{Dir}=293^\circ$ y $T_p=22\text{s}$. Fuente: Elaboración propia

5.1.2.2. Clima de olas en los puntos de control

Los resultados de la propagación de olas se muestran en la Figura 5.10 donde se observa la rosa de altura de olas de algunos puntos de control en la bahía (Figura 5.6), en la que se muestra que la zona sur de la bahía es la zona más protegida por los efectos del oleaje, debido a la forma semi cerrada que presenta la bahía. Mientras que la zona centro y norte es la zona donde el oleaje llega de forma casi directa debido a que ingresa por la bocana de acceso a la bahía.

Así mismo, en la Figura 5.11 se muestra la rosa de alturas de olas predominante en el punto del ológrafo, en la que se observa que la dirección predominante es Suroeste y Oeste-Suroeste, así mismo también se muestra la serie de tiempo extraída del modelo para el mismo punto de instalación del ológrafo.

En el anexo 1, se muestra toda la serie de tiempo, así como la rosa de altura de ola de cada uno de los puntos de control definido en la Figura 5.6.

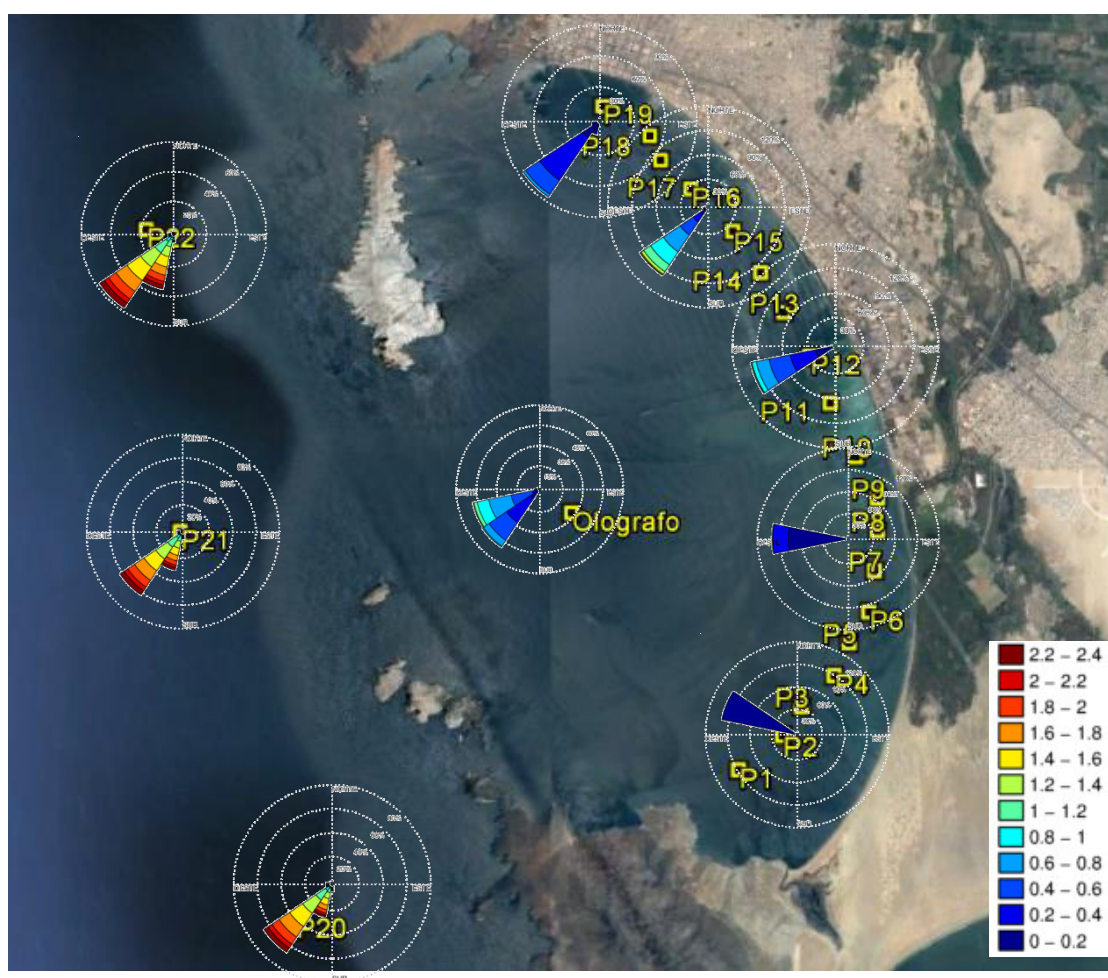


Figura 5.10.- Rosa de altura de olas en la bahía. Fuente: Elaboración propia

Resultado de la modelación de olas en el punto Ológrafo

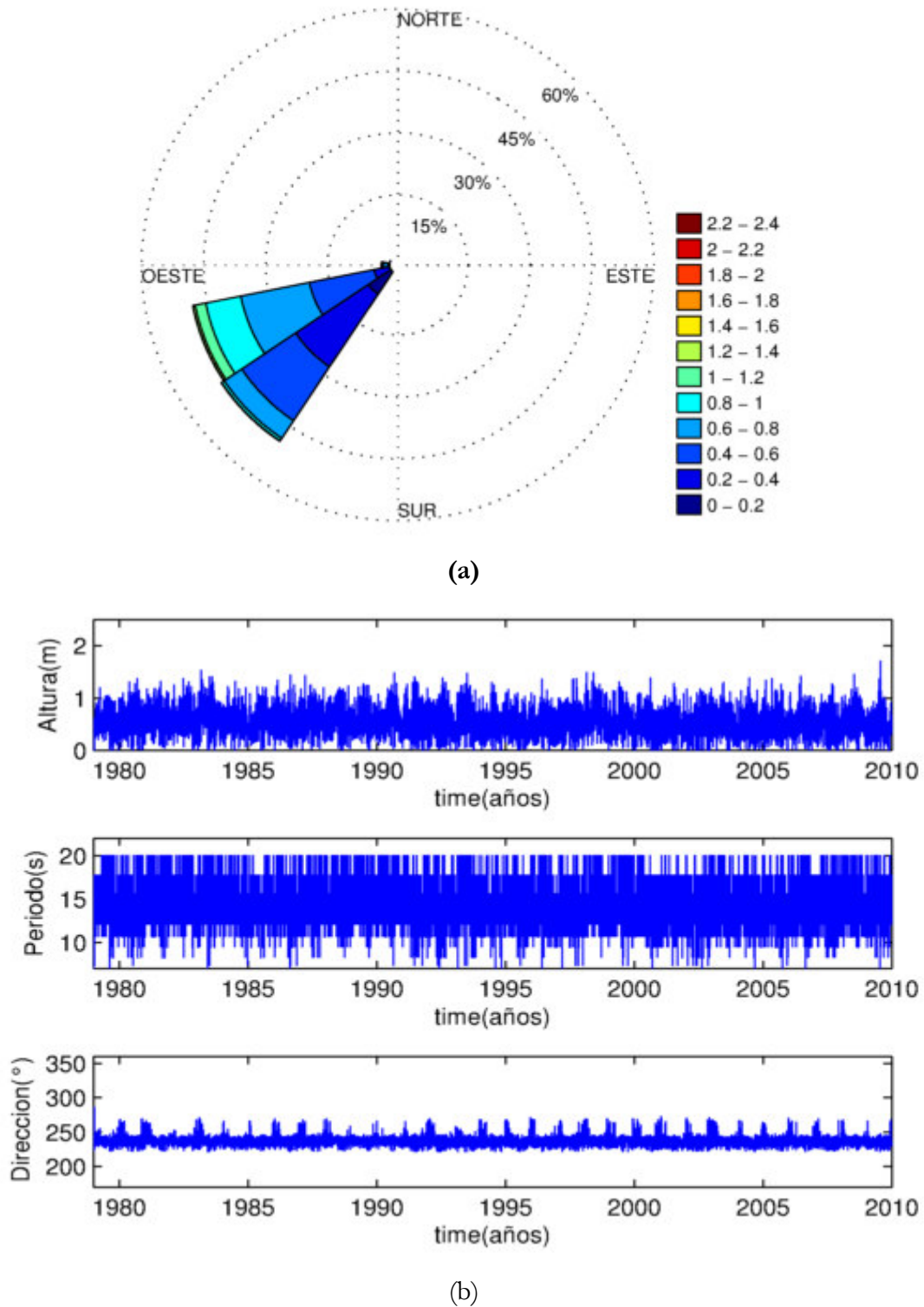


Figura 5.11.- Olas en el punto Ológrafo. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

5.1.2.3. Validación de los resultados de olas

En la Tabla 5.4 y Figura 5.12, se muestra la comparación del modelo con las mediciones realizadas por la DHN para el periodo de marzo a junio 2007, para la misma ubicación. En estos resultados se observa que los valores modelados se encuentran dentro del rango de variación de lo medido.

De este resultado, se observa que el mayor porcentaje de error entre lo medido y modelado, está en los mínimos con 43% de error, referido a la estadística (Tabla 5.4), en la que se muestra que del máximo al percentil 25 se encuentran dentro del rango de medición con errores menores a 28% de error, por lo que se podría indicar que el modelo está representando adecuadamente lo modelado.

Tabla 5.4.- Estadística básica de altura de olas, entre lo medido y modelado

Estadística	Ológrafo (Mar-Jun 2007)	Modelo (Mar-Jun 2007)	Porcentaje Error %
Máximo	1.1	1.25	14%
Percentil 75	0.5	0.64	28%
Promedio	0.453	0.5	10%
Percentil 25	0.37	0.33	11%
Mínimo	0.21	0.12	43%

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la Figura 5.12 se muestra la serie de tiempo del modelo y lo medido, observándose de forma general que el modelo sigue la misma tendencia de las alturas de olas medidas. En la Figura 5.13 (a) se muestra un gráfico boxplot que indicaría que lo modelado estaría dentro del rango de medición del modelo y presenta la misma tendencia de alturas de olas. Por otro lado, en la Figura 5.13 (b) se observa que la correlación de las alturas de olas medidas y modeladas es de $R=0.96$, y hace de esta información una fuente confiable de olas.

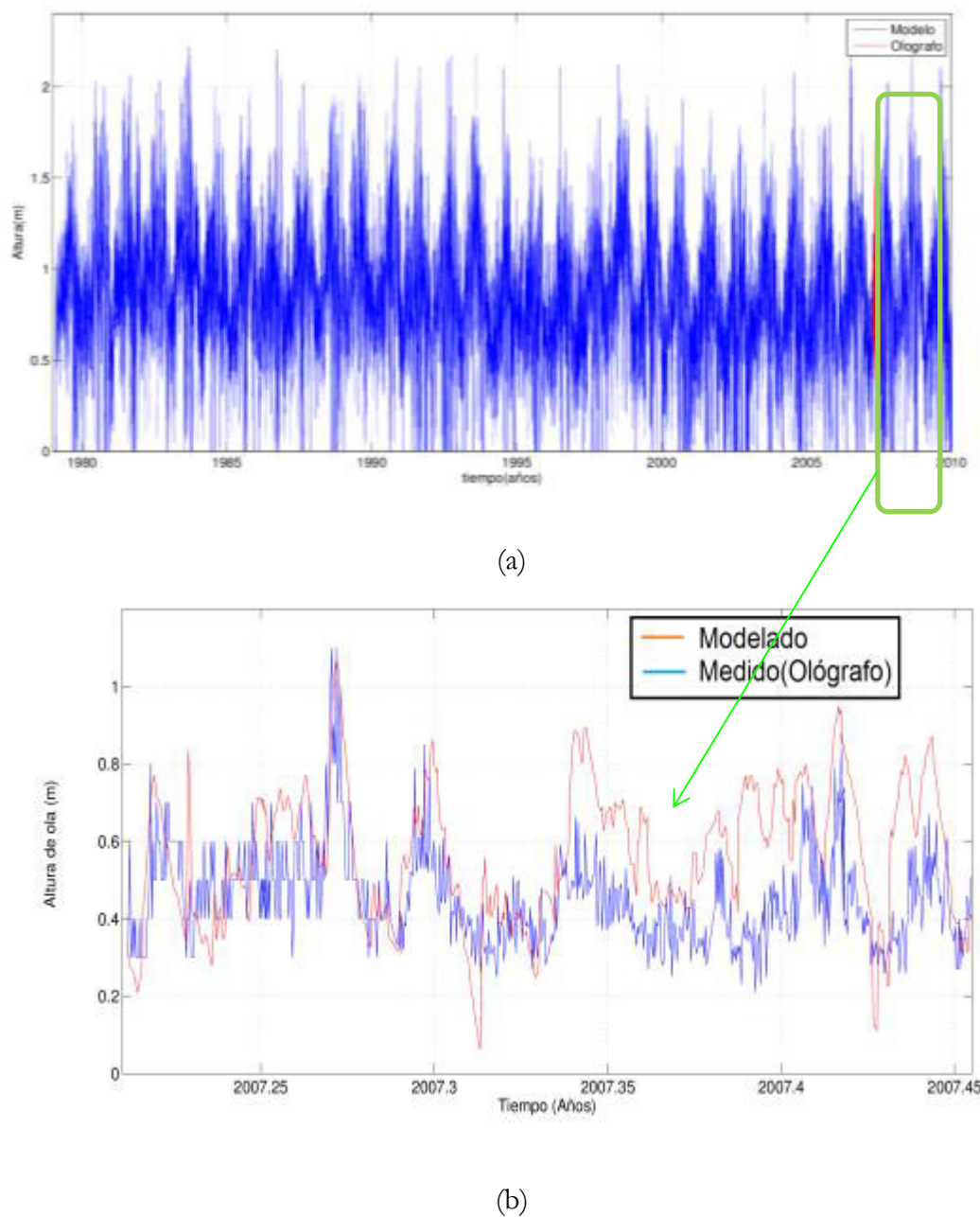
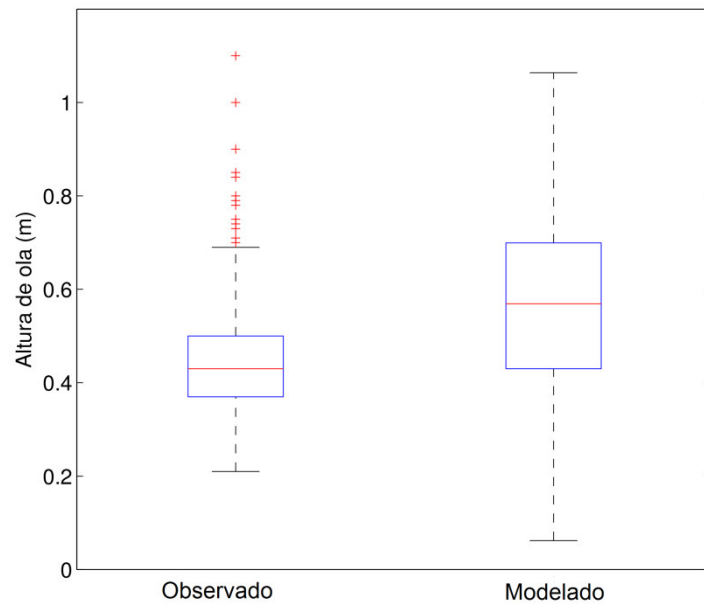
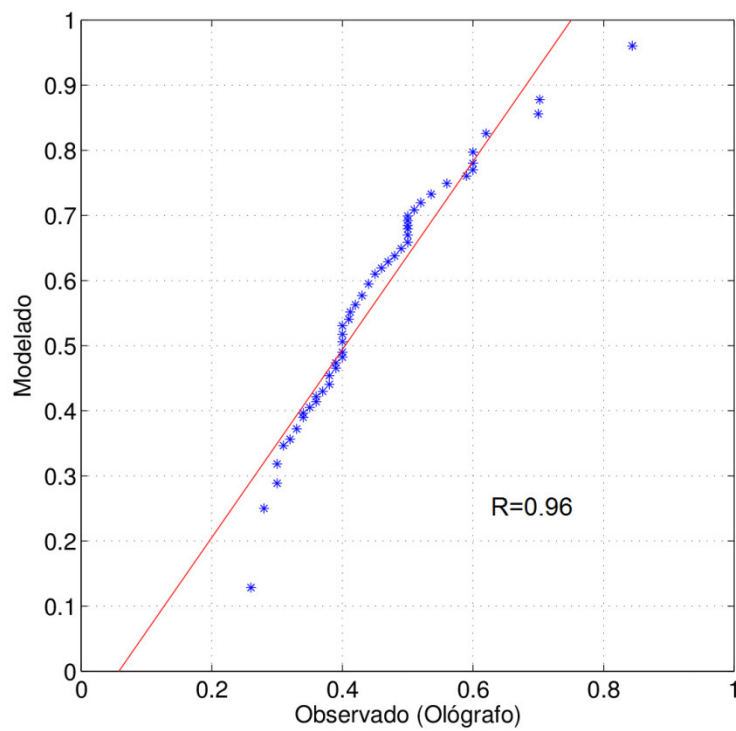


Figura 5.12.- Comparación de la serie de tiempo entre lo medido y modelado. Fuente:
Elaboración propia



(a)



(b)

Figura 5.13.- Validación del modelo de olas con el ológrafo. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.5 se muestra las alturas y direcciones de olas asociadas al flujo medio de energía para cada punto de control.

Tabla 5.5.- Flujo medio de energía en cada punto de control definido en la bahía

Estaciones	Altura de ola (m)	Dirección de ola (°)
Ológrafo	0.53	240.2
P1	0.16	293.1
P2	0.11	285.1
P3	0.08	280.1
P4	0.08	277.2
P5	0.10	270.9
P6	0.12	268.8
P7	0.15	264.0
P8	0.26	258.8
P9	0.28	259.6
P10	0.32	254.5
P11	0.42	250.2
P12	0.44	247.0
P13	0.53	243.8
P14	0.49	239.5
P15	0.63	235.2
P16	0.68	230.6
P17	0.70	226.5
P18	0.64	225.0
P19	0.29	218.3
P20	0.54	222.5
P21	0.28	221.9
P22	0.28	233.0

Fuente: Elaboración propia

5.2. Modelación del transporte de sedimentos y variación de la línea de costa en la bahía El Ferrol

5.2.1. Configuración del modelo

5.2.1.1. Grilla de cálculo

Para la generación de la grilla de cálculo que se presenta en la Figura 5.14, se empleó el programa RGFGRID y QUICKIN del mismo modelo DELFT3D, dicha grilla corresponde a una malla de 161x 34, que sigue la forma de la línea de costa.

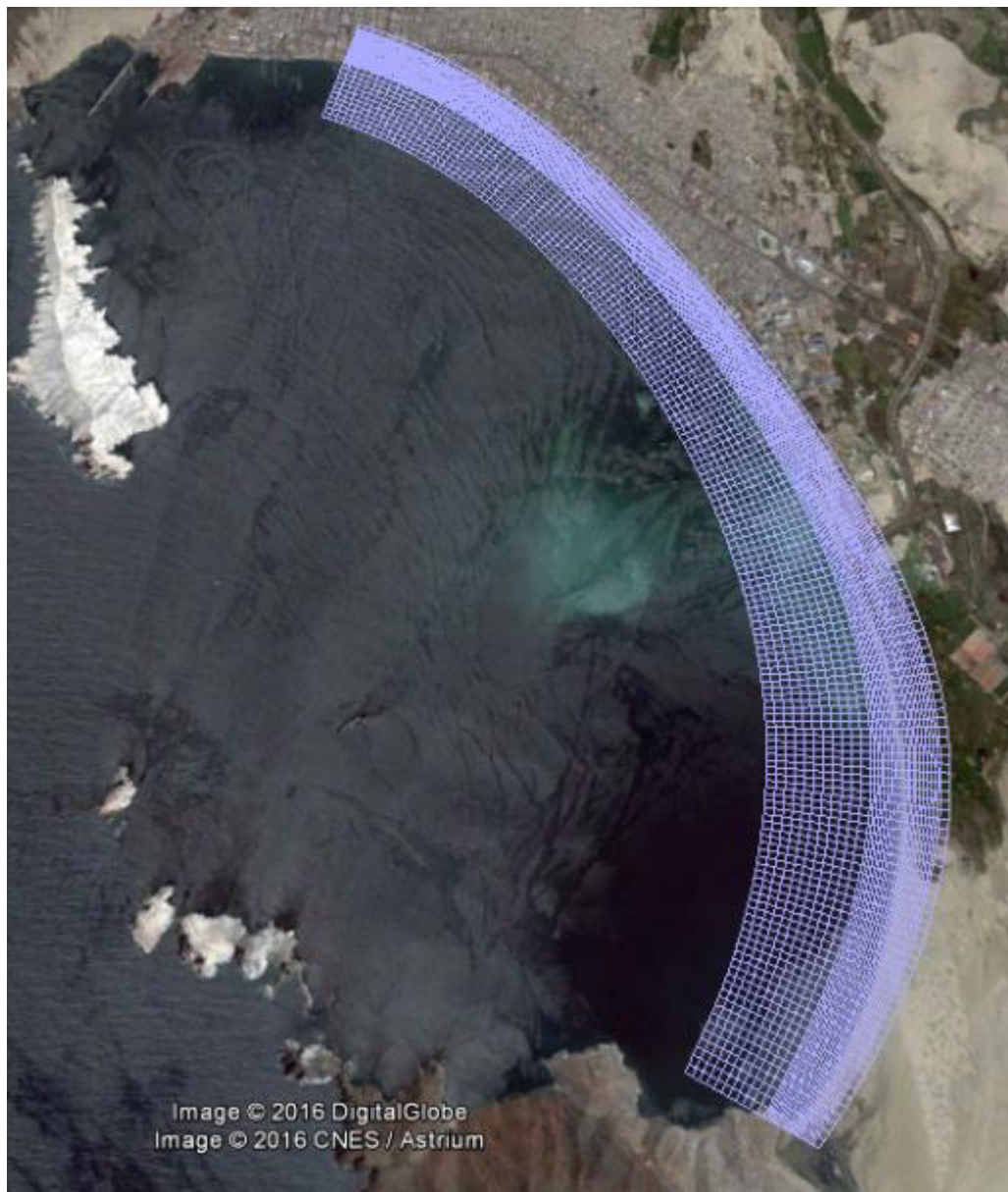


Figura 5.14.- Grilla de detalle empleada para el transporte. Fuente: Elaboración propia

5.2.1.2. Condiciones de frontera

Tomando en consideración las características de la grilla generada (Figura 5.14), el modelo tiene dos fronteras.

Frontera derecha: Se considera como frontera fija al enrocado ubicado al norte la bahía, muy cercano al enrocado de ENAPU.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0, \text{ cuando } i=N$$

Frontera izquierda: Se considera como frontera fija al Cerro Península, la misma que se describe de la siguiente manera:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0, \text{ cuando } i=1$$

5.2.1.3. Escenario de modelación

Los escenarios a modelar corresponden a lo siguiente:

- Escenario 01: Modelación sin considerar el aporte de sedimentos del río Lacramarca.
- Escenario 02: Modelación considerando el aporte de sedimentos del río Lacramarca cercano a la base naval de Chimbote (Ubicación de descarga hasta el 2009).
- Escenario 03: Modelación considerando el aporte de sedimentos del río Lacramarca a 1km al sur de la base naval de Chimbote (Ubicación de descarga del río al 2016).
- Escenario 04: Modelación igual al escenario 03 y un relleno artificial en la zona norte de la bahía.

5.2.1.4. Resultados de la modelación de transporte

a. Escenario 01: Modelación sin considerar el aporte de sedimentos del río Lacramarca.

La modelación realizada representa el resultado del comportamiento de la línea de costa proyectada a 20 años (2016 -2036), en base a la línea de costa actual de la bahía. Ver Figura 5.15.

Para fines de esta modelación, no se tomó en cuenta el aporte de sedimento proveniente del río Lacramarca por lo que la modelación considera como principal forzante a las olas. Así mismo, dentro de las limitaciones del modelo, este no considera la variación en fondo.

Con fines de explicar los resultados se zonifico el área de estudio en 3 zonas, zona norte, centro y sur, los mismos que son descritos a continuación:

✓ Zona Norte

La variación de la línea de costa muestra procesos de erosión con variaciones que van de 10 a 30m entre el año 2016 a 2036. Ver Figura 5.16

✓ Zona Centro

La variación de la línea de costa muestra procesos de erosión en la zona donde se ubica el río Lacramarca, con variaciones de hasta 5m, siendo el máximo retroceso de playa en la zona de la desembocadura del río, lo que nos indicaría, que, sin el aporte de sedimentos del río, la costa en ese sector, presenta tendencias a erosionar hasta alcanzar el equilibrio. Ver Figura 5.17.

Se debe tener en consideración que los resultados obtenidos en este sector se encuentran en un área donde a través de los años ha habido un aporte de sedimentos continuo, formando un perfil costero curvo, sin embargo, al quitarle este aporte de sedimentos, el perfil costero curvo tiende a ser más cóncavo y por tanto pierde sedimentos.

✓ Zona Sur

La línea de costa muestra que esta área de la bahía ha alcanzado el equilibrio y presenta una estabilidad del perfil costero. Ver Figura 5.18.



Figura 5.15.- Variación de la línea de costa en la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01.

Fuente: Elaboración propia

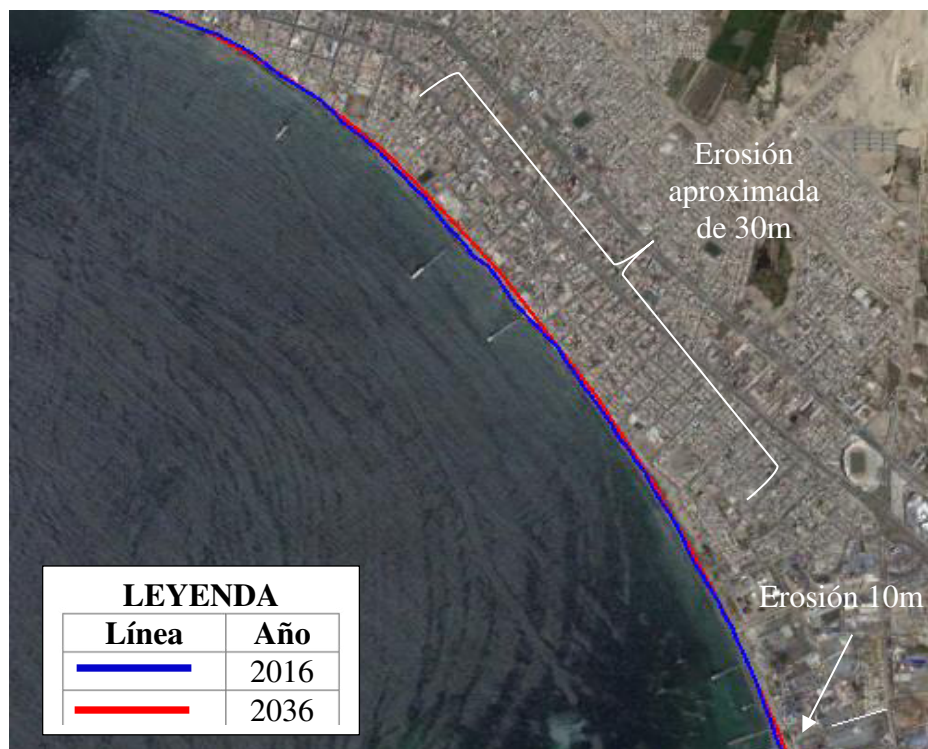


Figura 5.16.- Variación de la línea de costa en la zona norte de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01. Fuente: Elaboración propia



Figura 5.17.- Variación de la línea de costa en la zona centro de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01. Fuente: Elaboración propia

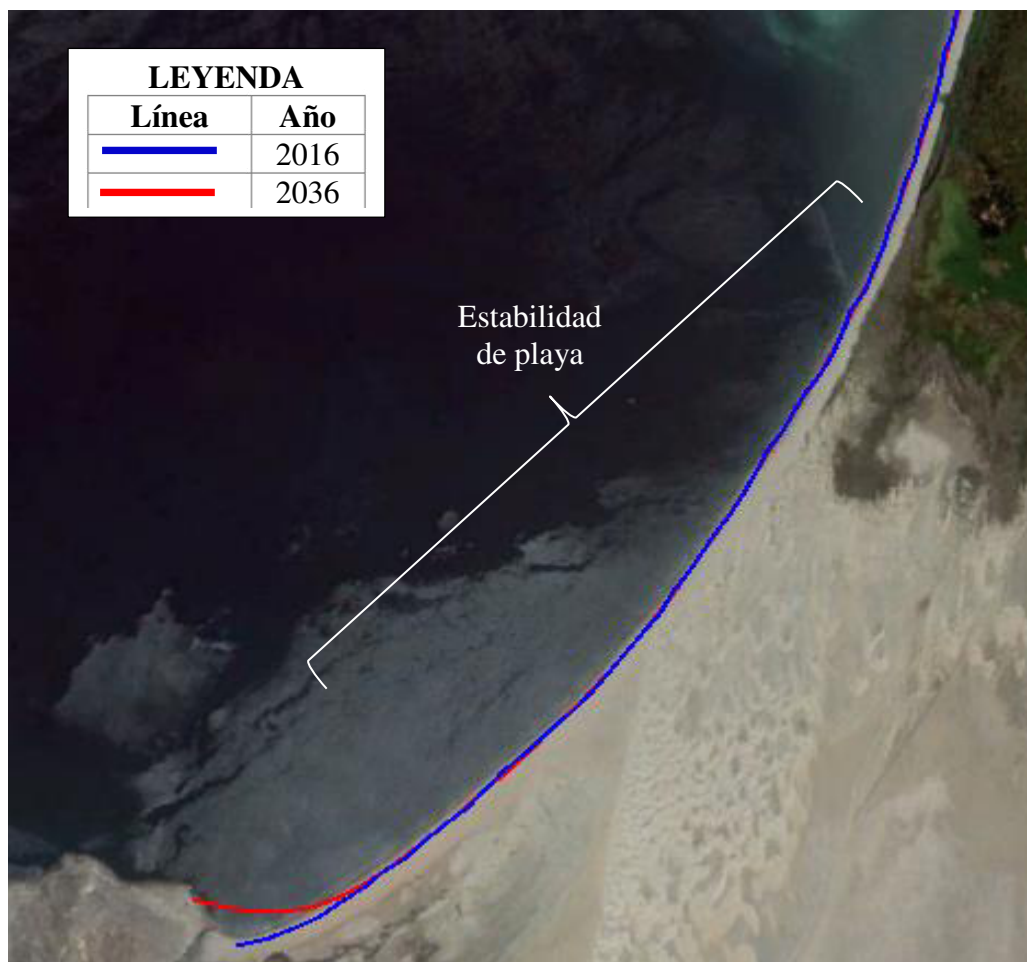


Figura 5.18.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01. Fuente: Elaboración propia

b. Escenario 02: Modelación considerando el aporte de sedimentos del río

Lacramarca cercano a la base naval de Chimbote (Ubicación de descarga hasta el 2009).

La modelación realizada representa el resultado del comportamiento de la línea de costa proyectada a 20 años (2016 -2036), en base a la línea de costa actual de la bahía. Ver Figura 5.19.

Para fines de esta modelación, se consideró un aporte de sedimento continuo de 0.059m³/s, proveniente del río Lacramarca. Así mismo, dentro de las limitaciones del modelo, este no considera la variación en fondo, ni tampoco las variaciones geomorfológicas locales.

Con fines de explicar los resultados se zonifico el área de estudio en 3 zonas, zona norte, centro y sur, los mismos que son descritos a continuación:

✓ **Zona Norte**

La variación de la línea de costa muestra procesos de erosión de hasta 35m, sin embargo, existen sectores en los que la costa tiende a estabilizarse. Ver Figura 5.20.

✓ **Zona Centro**

La variación de la línea de costa muestra procesos de sedimentación en la zona donde descarga el río Lacramarca, con variaciones de aproximadamente 27m, siendo la máxima sedimentación de la playa en la zona donde desemboca el río, lo que nos indicaría, que el sedimentos proveniente del río tiende a dispersarse y modificar el perfil costero en ese sector, sin embargo este aporte de sedimentos permite que la playa se incremente hasta lograr estabilizarse, pudiendo alcanzar una sedimentación de playa de hasta 8m. Ver Figura 5.21.

✓ **Zona Sur**

La variación de la línea de costa muestra variaciones muy pequeñas, aproximadamente 3m de sedimentación en ciertos sectores, por lo que se podría decir que la costa se encuentra en equilibrio. Ver Figura 5.22.



Figura 5.19.- Variación de la línea de costa en la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 01.

Fuente: Elaboración propia

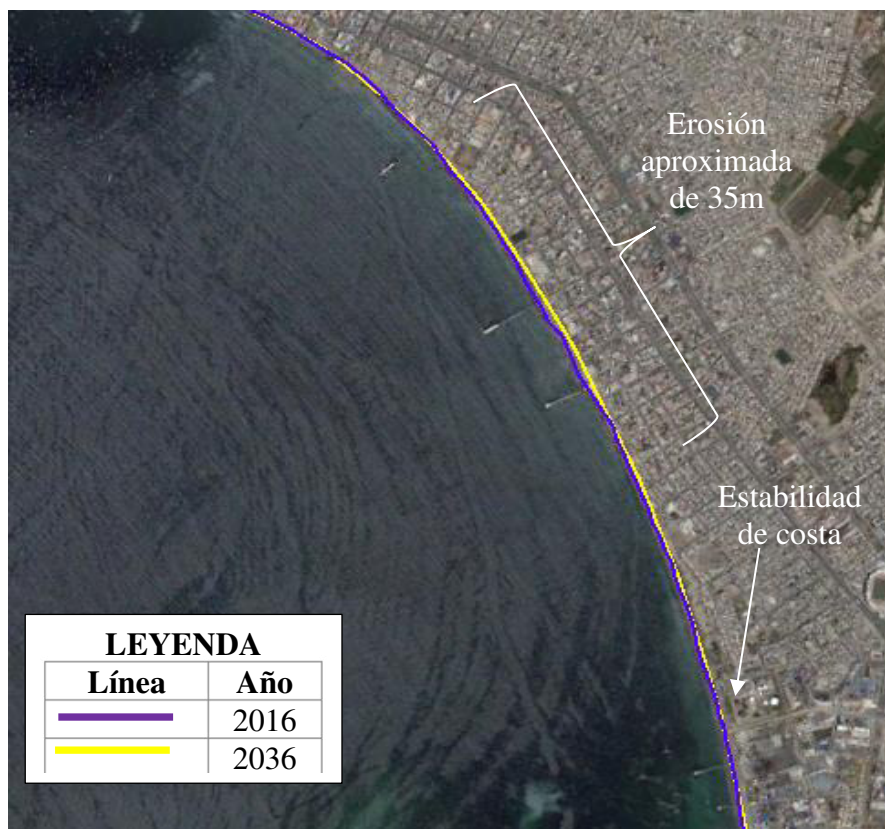


Figura 5.20.- Variación de la línea de costa en la zona norte de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 02. Fuente: Elaboración propia

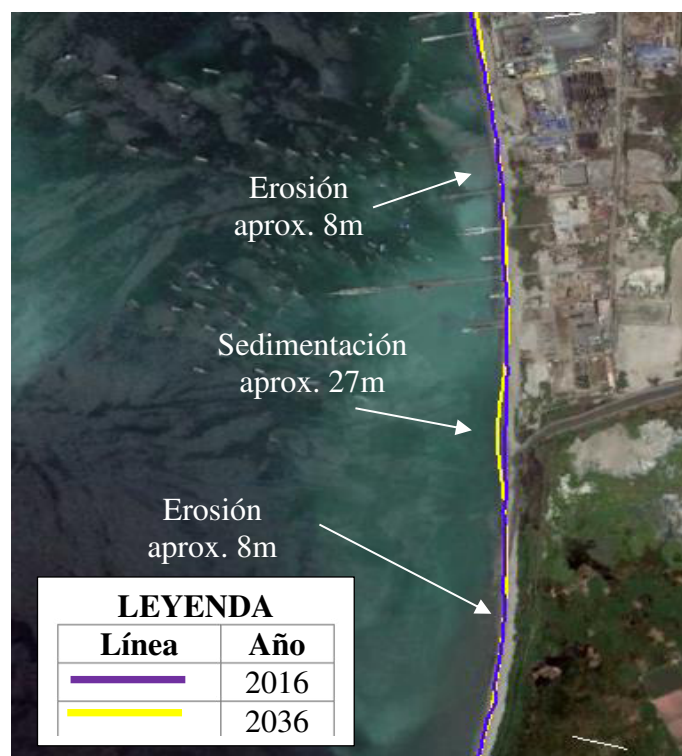


Figura 5.21.- Variación de la línea de costa en la zona centro de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 02. Fuente: Elaboración propia



Figura 5.22.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 02. Fuente: Elaboración propia

c. Escenario 03: Modelación considerando el aporte de sedimentos del río Lacramarca a 1km al sur de la base naval de Chimbote (Ubicación de la descarga del río al 2016).

La modelación realizada representa el resultado del comportamiento de la línea de costa proyectada a 20 años (2016 -2036), en base a la línea de costa actual de la bahía. Ver Figura 5.23.

Para fines de esta modelación, se consideró un aporte de sedimento continuo de 0.059m³/s, proveniente del río Lacramarca. Así mismo, dentro de las limitaciones del modelo, este no considera la variación en fondo.

Con fines de explicar los resultados se zonifico el área de estudio en 3 zonas, zona norte, centro y sur, los mismos que son descritos a continuación:

✓ **Zona Norte**

La variación de la línea de costa muestra procesos de erosión de hasta 35m, sin embargo, existen sectores en los que la costa tiende a estabilizarse. Ver Figura 5.24.

✓ **Zona Centro**

La variación de la línea de costa muestra procesos de erosión en la zona donde descarga el río Lacramarca. Así mismo, se puede observar que la dinámica marina presenta una tendencia natural a la erosión en esta zona, la cual se ha visto mitigada a través de los años por el aporte de sedimentos proveniente del río Lacramarca. Esta erosión es de aproximadamente 8m del año 2016 a 2036. Ver Figura 5.25.

✓ **Zona Sur**

En esta zona existe una sedimentación de hasta 3m, sin embargo, en el punto de la descarga existe una acumulación de sedimentos de hasta 25m. Ver Figura 5.26.

Por otro lado, se realizó una validación entre lo modelado en este escenario y lo medido con imágenes multitemporales (Tabla 5.6), los mismos que se describen a continuación:

- La sedimentación en la zona sur de la bahía, con una tasa aproximada de 1.90m/año (medido) y 0.72m/año (modelado), identificándose en este sector un proceso definido de sedimentación.
- El otro proceso identificado es de erosión en toda la zona norte y centro de la bahía, con una erosión aproximada de 0.35m/año (medido) y 0.60m/año (modelado).

Estos dos procesos identificados tanto en lo modelado como en lo medido, corroboran que el modelo desarrollado está representado la dinámica del transporte de sedimentos en la bahía.



Figura 5.23.- Variación de la línea de costa en la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 03.

Fuente: Elaboración propia

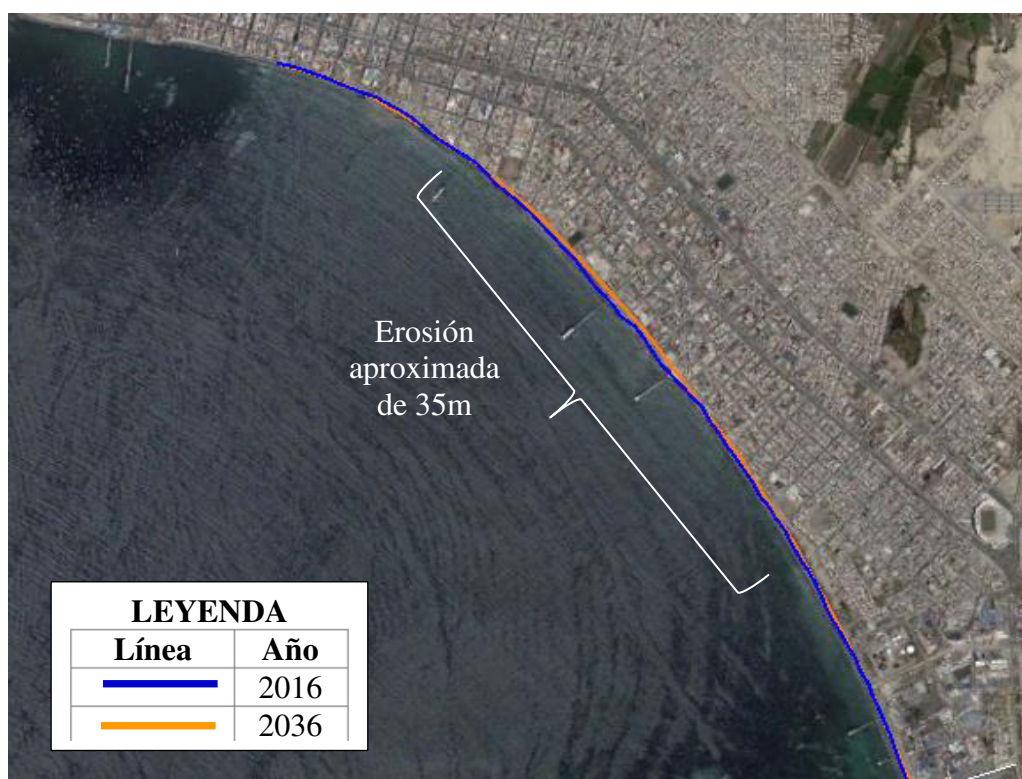


Figura 5.24.- Variación de la línea de costa en la zona norte de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 03. Fuente: Elaboración propia



Figura 5.25.- Variación de la línea de costa en la zona centro de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 03. Fuente: Elaboración propia

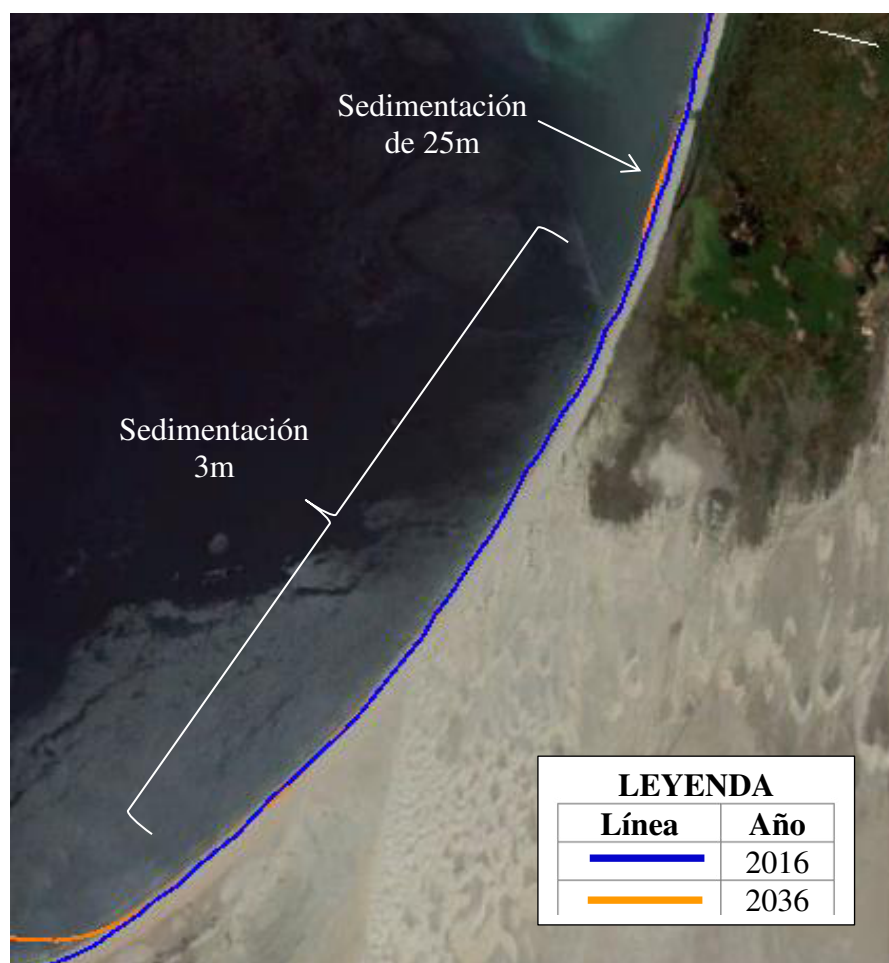


Figura 5.26.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 03. Fuente: Elaboración propia

Validación

Para determinar la validez del modelo aplicado a la bahía Ferrol, se compara las tasas de variación del perfil costero entre lo medido y lo observado (Tabla 5.6).

Tabla 5.6.- Tasa de variación (m/año) de la línea de costa medido y modelado

Tramo	Variación del perfil costero				Tasa de variación (m/año)		Promedio de tasa de variación (m/año)		Descripción
	Modelado		Observado		Modelado	Observado	Modelado	Observado	
	2016	2036	2003	2017	2016-2036	2003-2017	2016-2036	2003-2017	
L1	0	80	0	31.8	4.00	2.27	0.72	1.90	Sedimentación
L2	0	3	0	32.06	0.15	2.29			
L3	0	5	0	29.17	0.25	2.08			
L4	0	0	0	29.94	0.00	2.14			
L5	0	-2	0	19.28	-0.10	1.38			
L6	0	0	0	16.97	0.00	1.21			
L7	0	14	0	-5	0.70	-0.36	-0.35	-0.60	Erosión
L8	0	10	0	35.12	0.50	2.51			
L9	0	-10	0	-10	-0.50	-0.71			
L10	0	-10	0	-35	-0.50	-2.50			
L11	0	-5	0	0	-0.25	0.00			
L12	0	-13	0	0	-0.65	0.00			
L13	0	0	0	-2	0.00	-0.14			
L14	0	-8	0	-2	-0.40	-0.14			
L15	0	-20	0	-26	-1.00	-1.86			
L16	0	-30	0	-34	-1.50	-2.43			
L17	0	-18	0	-25	-0.90	-1.79			
L18	0	0	0	5	0.00	0.36			
L19	0	0	0	-9.6	0.00	-0.69			

Fuente: Elaboración propia

d. **Escenario 04: Modelación igual al escenario 03 y un relleno artificial en la zona norte de la bahía.**

La modelación realizada representa el resultado del comportamiento de la línea de costa proyectada a 20 años (2016 -2036), en base a la línea de costa actual de la bahía.

Para fines de esta modelación, se consideró un aporte de sedimento de $0.059 \frac{m^3}{s}$ de la siguiente forma:

- Proveniente del río Lacramarca del 2016 a 2036
- Relleno artificial durante los años 2016 a 2017 en los puntos definidos en Figura 5.27.
- Relleno artificial durante los años 2020 a 2021 en los puntos definidos en Figura 5.27.
- Relleno artificial durante los años 2024 a 2025 en los puntos definidos en Figura 5.27.

En cuanto al relleno artificial, este equivaldría a decir que se tendría que incorporar anualmente un volumen de 1'860,624 m³/año.



Figura 5.27.- Puntos de aporte de sedimentos artificial (relleno artificial) en la bahía de Ferrol. Fuente: Elaboración propia

Con fines de explicar los resultados mostrados en la Figura 5.28, se zonifico el área de estudio en 3 zonas, zona norte, centro y sur, los mismos que son descritos a continuación:

✓ **Zona Norte**

La variación de la línea de costa muestra procesos de sedimentación en la zona donde se emitió un aporte de sedimentos artificial de hasta 110m, sin embargo, existen sectores en los que la costa tiende a estabilizarse. Ver Figura 5.29.

✓ **Zona Centro**

La variación de la línea de costa muestra procesos de erosión en la zona donde descargaba inicialmente el río Lacramarca, con variaciones de aproximadamente 8m. Ver Figura 5.30.

✓ **Zona Sur**

La variación de la línea de costa muestra variaciones muy pequeñas, aproximadamente 3m de sedimentación; sin embargo, en la zona donde descarga el río se observa procesos de sedimentación de hasta 25m. Ver Figura 5.31.

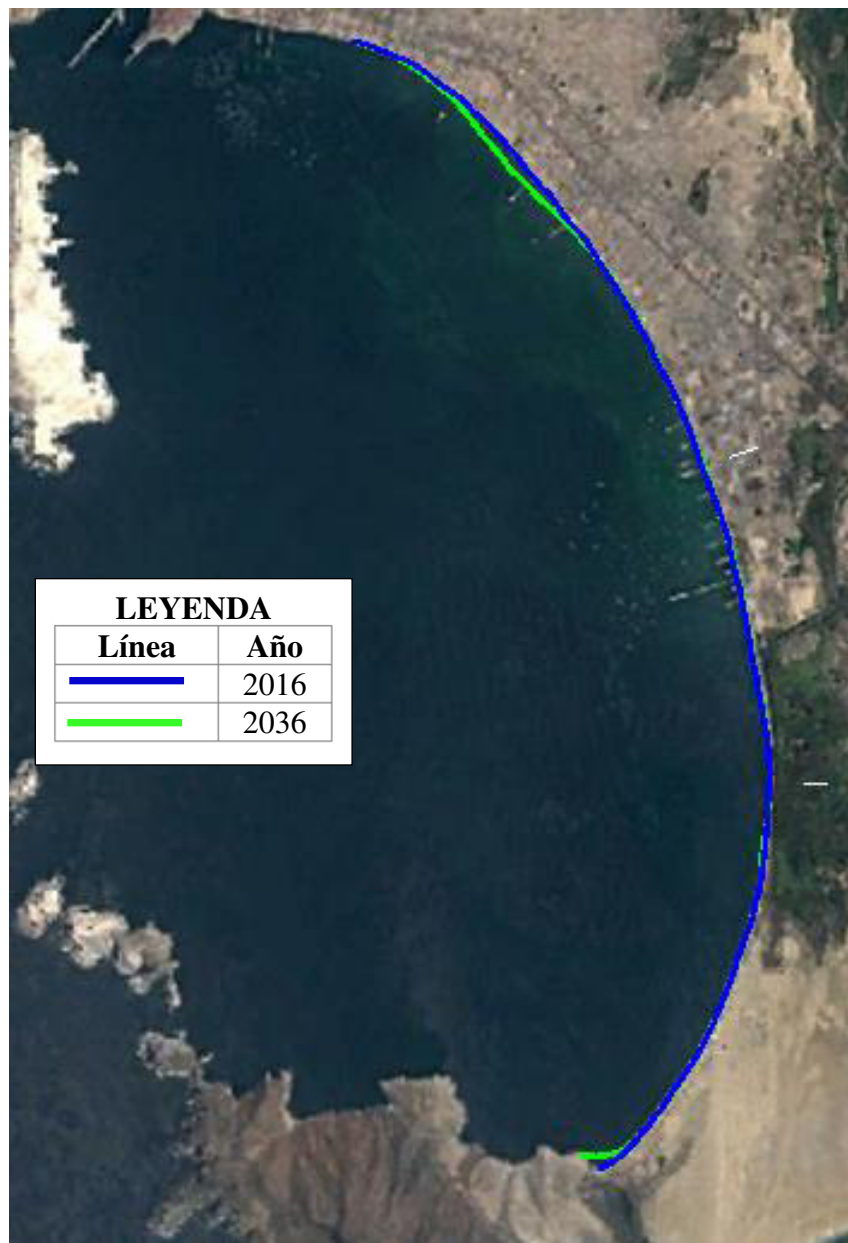


Figura 5.28.- Variación de la línea de costa en la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 04.

Fuente: Elaboración propia

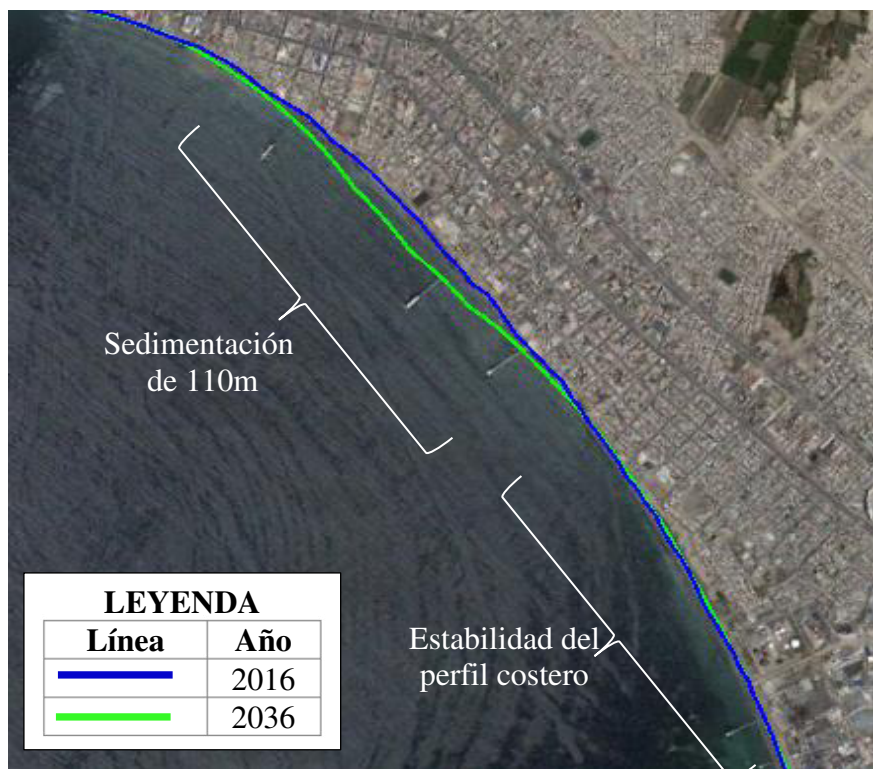


Figura 5.29.- Variación de la línea de costa en la zona norte de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 04. Fuente: Elaboración propia

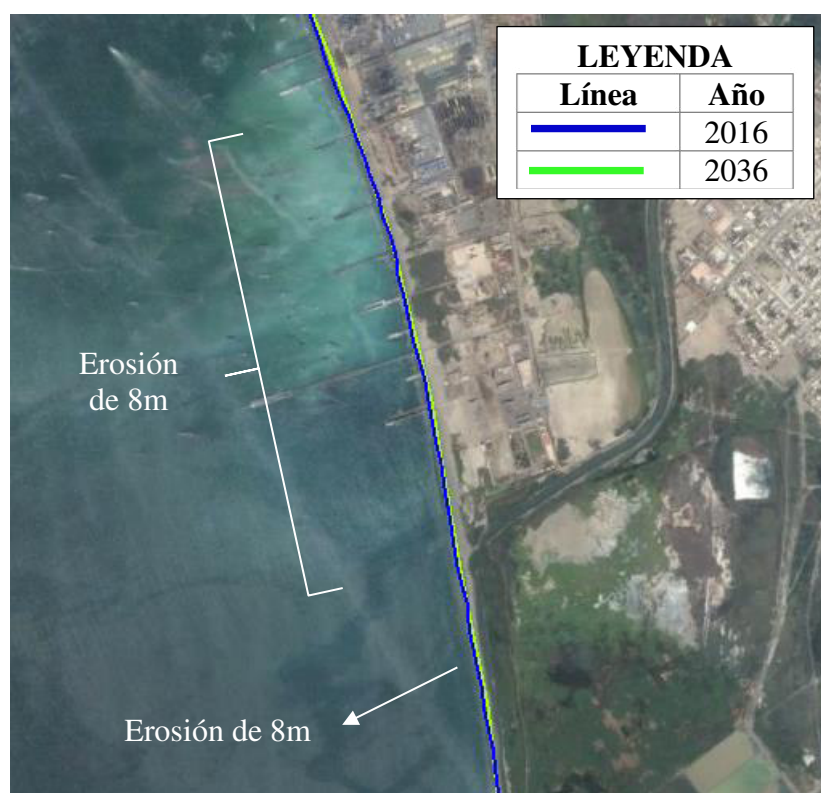


Figura 5.30.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 04. Fuente: Elaboración propia

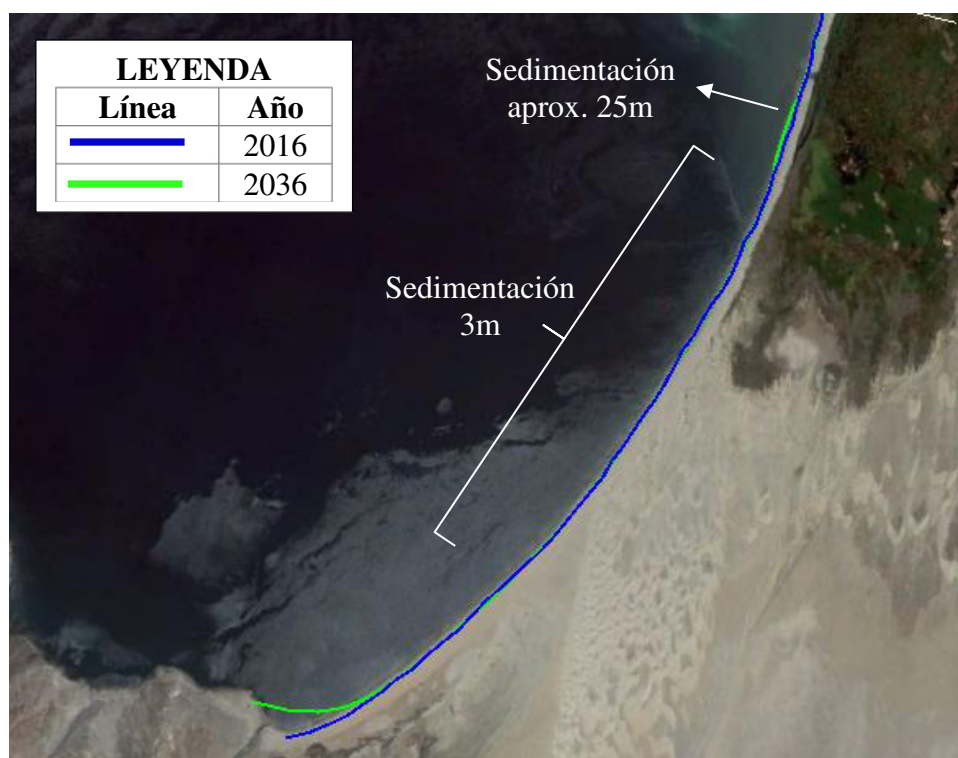


Figura 5.31.- Variación de la línea de costa en la zona sur de la bahía Ferrol-Chimbote, Escenario 04. Fuente: Elaboración propia

5.2.1.5. Puntos de control

Se definieron 8 puntos de control con la finalidad de monitorear la tendencia de la evolución de la línea de costa, los mismos que corresponden a puntos de transectas definidas en la malla de detalle, el cual nos brinda la evolución de la línea de costa durante todo el tiempo de simulación. Las coordenadas próximas del punto base de grilla definido se muestran en la Figura 5.32 y Tabla 5.7.

Tabla 5.7.- Coordenadas de los puntos de control definidos en la línea base del modelo de transporte de sedimentos

Estaciones	Latitud	Longitud
P(20)	9.16265° Sur	78.5621° Oeste
P(40)	9.14916° Sur	78.5555° Oeste
P(60)	-9.13444° Sur	78.5546° Oeste
P(80)	-9.12053° Sur	78.5582° Oeste
P(100)	-9.10749° Sur	78.5638° Oeste
P(120)	-9.09525° Sur	78.5708° Oeste
P(140)	-9.08344° Sur	78.5798° Oeste
P(158)	-9.07538° Sur	78.5903° Oeste

Fuente: Elaboración propia

Así mismo para fines de observar la variación de la costa a través del tiempo se crearon figuras que permita determinar los cambios que sufre cada punto de control definido para los escenarios 01, 02, 03 y 04, los mismos que se describen a continuación:

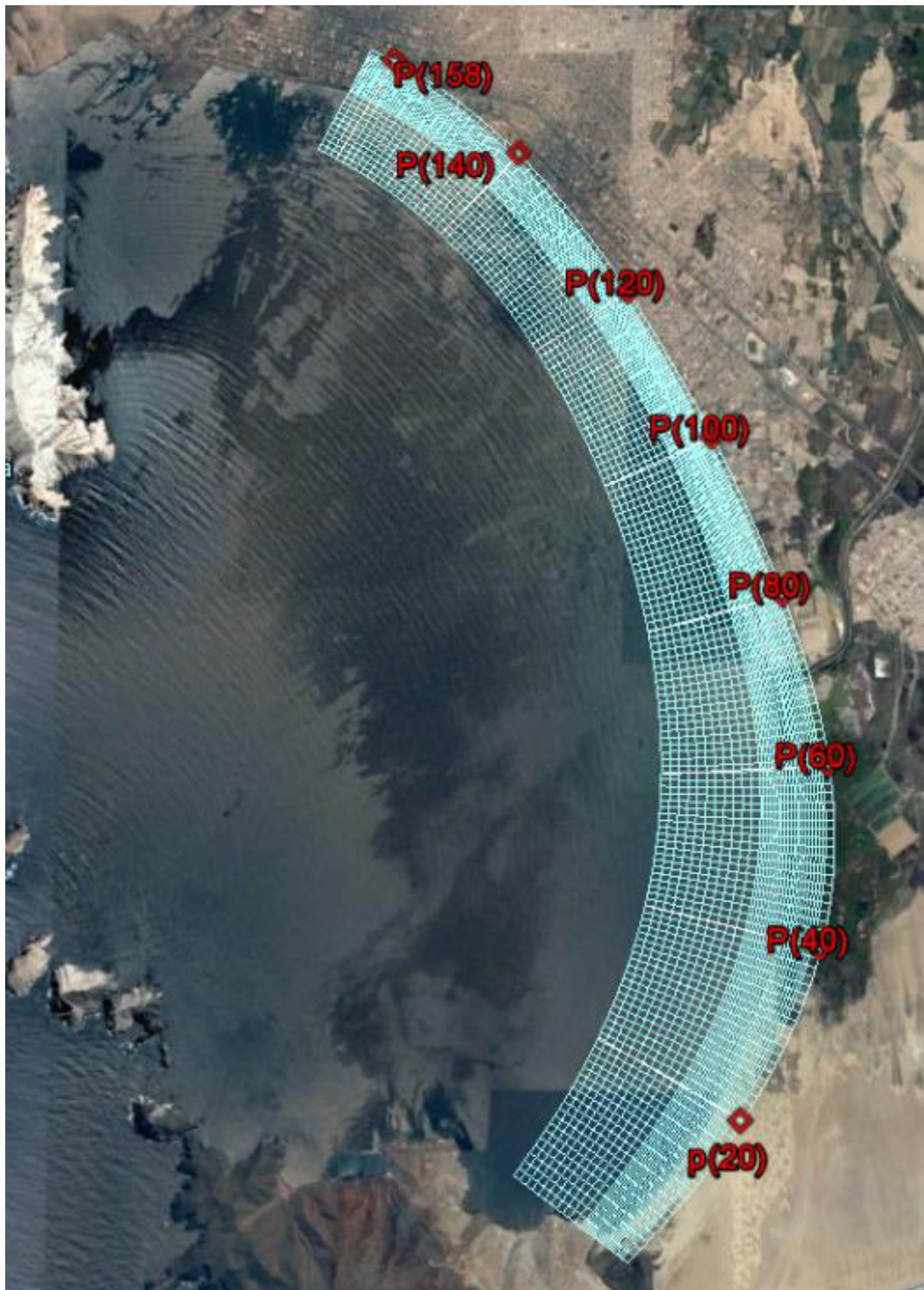


Figura 5.32.- Ubicación de los puntos de control definidos en la línea base del modelo de variación de línea de costa. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.33 se muestra la evolución del perfil costero del 2016 a 2036 para los puntos de control P(20), P(40), P(60), P(80); P(100), P(120), P(140) y P(158), en la que se observa el detalle de la evolución de la línea de costa para los escenarios 01 (sin aporte del río Lacramarca), escenario 02 (con aporte del río Lacramarca), escenario 03 (considerando que la descarga del río se mueve 1km al sur) y escenario 04 (Considerando igual que el escenario 03 con relleno artificial en el norte de la bahía).

En todos estos escenarios, se observa de forma general que algunas transectas presentan cambios en el perfil costero. Así mismo, se debe tener en cuenta que, de acuerdo a los resultados del modelo, se podría indicar que los primeros años de simulación (aproximadamente 3 años), corresponden al tiempo de calentamiento del modelo, así mismo, los resultados son descritos a continuación.

- Las transectas de control ubicadas al centro y sur de la bahía, definidas como P(20), P(40), P(60), P(80) y P(100) se mantienen casi sin cambios en los escenarios 01, 02, 03 y 04, por lo que se podría indicar que en la actualidad esta zona se encuentra en un estado de equilibrio dinámico que a través del tiempo no sufren cambios significativos de erosión o sedimentación.
- La transecta definida como P(120) muestra una tendencia a la erosión en los escenarios 01, 02 y 03, sin embargo en el escenario 04 observamos que el proceso de erosión disminuye y se estabiliza en el tiempo.
- La transecta definida como P(140) muestra una tendencia a erosionar en aproximadamente 20m tanto para el escenario 01, 02 y 03, sin embargo en el escenario 04 con relleno artificial, se observa que esta logra sedimentar la playa en aproximadamente 110m.
- La transecta P(158) se encuentra en una zona dinámicamente estable, la cual se muestra en los escenarios 01, 02, 03 y 04.

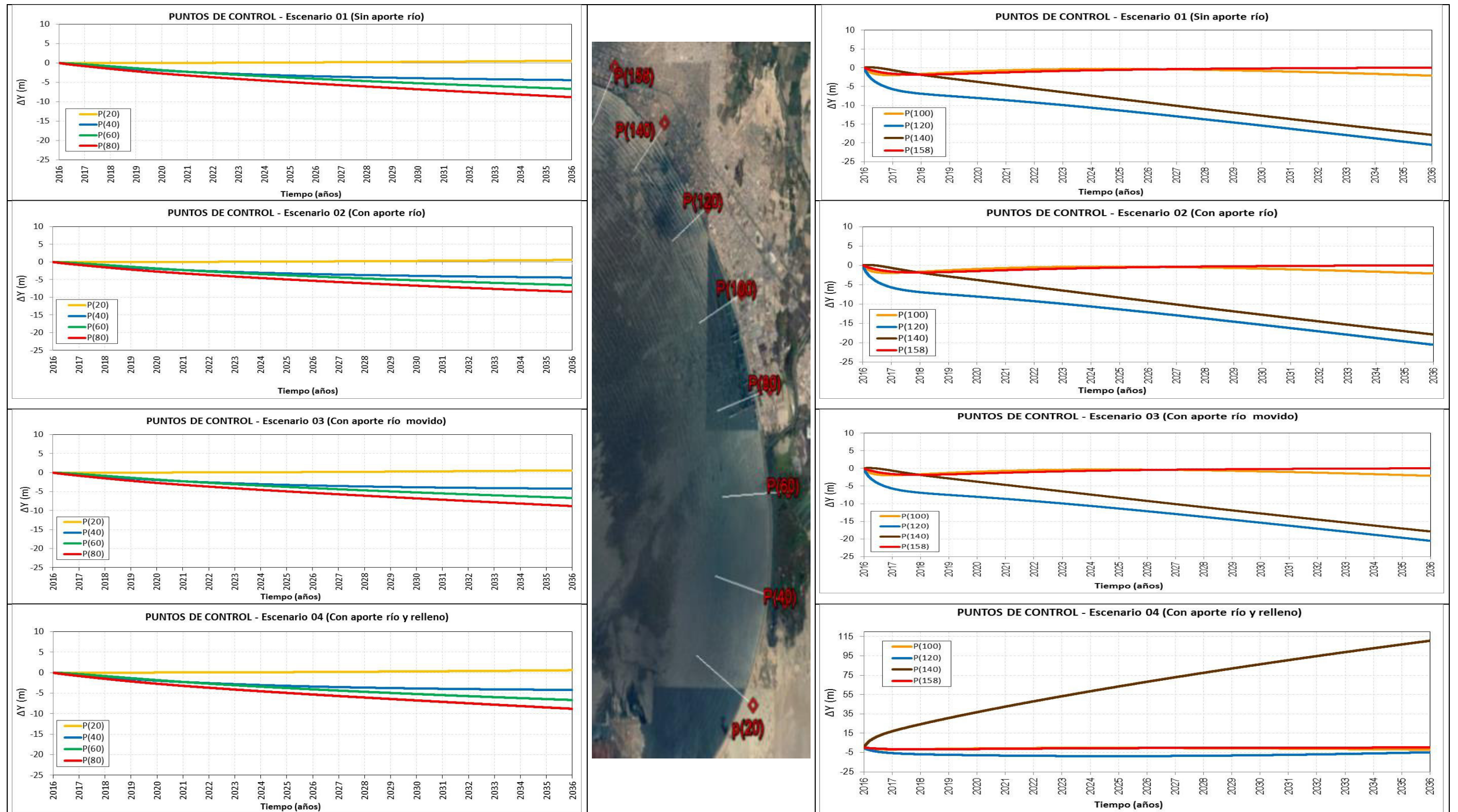


Figura 5.33.- Evolución de la línea de costa en los puntos de control P(20), P(40), P(60), P(80), P(100), P(120), P(140) y P(158). Fuente: Elaboración propia

Así mismo, de estos mismos puntos de control se establecieron los transportes litorales calculados, mostrándose en (+) la dirección hacia el norte y (-) para un transporte hacia el sur, los cuales se describen en la Tabla 5.8, Tabla 5.9, Tabla 5.10, Tabla 5.11 y Figura 5.34, Figura 5.35, Figura 5.36 y Figura 5.37.

- El punto de control P (20) y P (40) casi no muestra variaciones de transporte, tanto en el escenario 01, 02, 03 y 04 mostrando transportes entre [13.98 a 19.54] x 1000 m³/año con dirección al norte.
- El punto de control P (60) muestra en el escenario 01 sin aporte del río Lacramarca que el transporte es de dirección al Sur con 6.18x1000 m³/año, y cuando se ingresa el aporte del río (escenario 02), este transporte se incrementa ligeramente en 6.22x1000 m³/año con dirección sur. Así mismo el escenario 03 y 04 indican que al mover el río y al agregar sedimentos en la zona norte de la bahía, este transporte se reduce ligeramente en 6.18x1000m³/año.
- El punto de control P (80) y P (100) muestra en general un transporte de sedimentos con dirección al Norte de [17.39 a 30.97]x1000 m³/año, siendo el máximo transporte en el escenario 02, con aporte del río Lacramarca.
- El punto de control P (120) muestra un transporte hacia el sur de 20.01x1000 m³/año en los escenarios 01, 02 y 03, mientras que en el escenario 04 se observa que este transporte se incrementa debido al relleno artificial a 70.87x1000m³/año.
- El punto de control P (140) muestra en el escenario 01, 02 y 03 un transporte de sedimentos hacia el norte de 83.24x1000m³/año, mientras que al realizar el relleno artificial este transporte se ve invertido con dirección sur en 105.89x1000 m³/año.
- El punto de control P (158), muestra un transporte de 202.43x1000 m³/año el cual permanece igual en los 04 escenarios definidos.

Tabla 5.8.- Transporte de sedimentos en los puntos de control para el escenario 01 (sin río)

Tiempo (años)	Transporte potencial de sedimentos (m3/año)							
	P(20)	P(40)	P(60)	P(80)	P(100)	P(120)	P(140)	P(158)
2016	18603	10240	-16592	42779	-1392	12028	121771	-230794
2017	18811	10740	-15611	37714	10407	14572	110971	-222812
2018	18997	11538	-13576	33480	15430	-1983	121932	-214151
2019	19178	12237	-11783	32690	18096	-16386	123662	-210482
2020	19351	12839	-10248	32640	19765	-25112	120287	-208513
2021	19516	13354	-8945	32468	20716	-29922	115137	-207262
2022	19671	13803	-7840	32217	21159	-32323	109257	-206377
2023	19815	14192	-6880	31847	21284	-33202	103058	-205701
2024	19945	14528	-6054	31397	21093	-33130	96776	-205177
2025	20058	14818	-5329	30919	20838	-32402	90567	-204749
2026	20183	15068	-4681	30421	20492	-31251	84530	-204387
2027	20308	15286	-4111	29932	20111	-29816	78724	-204089
2028	20373	15485	-3590	29458	19719	-28195	73180	-203811
2029	20498	15642	-3128	29004	19350	-26449	67909	-203593
2030	20561	15772	-2694	28563	18977	-24634	62906	-203366
2031	20656	15926	-2317	28165	18648	-22774	58163	-203185
2032	20698	16023	-1947	27776	18349	-20895	53664	-203017
2033	20814	16083	-1621	27425	18063	-19014	49391	-202861
2034	20814	16217	-1319	27094	17831	-17142	45331	-202721
2035	20918	16241	-1027	26785	17606	-15289	41464	-202597
2036	10491	8125	-410	13291	8756	-6961	19348	-101281
PROMEDIO	19536	14007	-6176	30289	17395	-20013	83239	-202425

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.9.- Transporte de sedimentos en los puntos de control para el escenario 02 (con río)

Tiempo (años)	Transporte potencial de sedimentos (m3/año)							
	P(20)	P(40)	P(60)	P(80)	P(100)	P(120)	P(140)	P(158)
2016	18606	10239	-16593	42779	-1392	12030	121772	-230793
2017	18802	10740	-15611	37713	10407	14574	110973	-222812
2018	18996	11542	-13577	33480	15430	-1983	121932	-214151
2019	19180	12236	-11782	32698	18095	-16386	123656	-210481
2020	19353	12835	-10248	32606	19765	-25112	120287	-208515
2021	19516	13354	-8947	32489	20716	-29922	115138	-207261
2022	19668	13803	-7837	32240	21154	-32322	109257	-206374
2023	19811	14191	-6884	31892	21244	-33212	103058	-205705
2024	19945	14528	-6057	31493	21108	-33128	96776	-205177
2025	20069	14819	-5332	31082	20837	-32403	90567	-204748
2026	20185	15071	-4692	30686	20491	-31251	84529	-204389
2027	20292	15290	-4124	30326	20110	-29816	78724	-204083
2028	20391	15479	-3616	30012	19721	-28194	73181	-203818
2029	20483	15644	-3160	29753	19342	-26450	67909	-203584
2030	20568	15786	-2749	29551	18982	-24633	62907	-203376
2031	20647	15909	-2378	29409	18649	-22773	58163	-203188
2032	20719	16016	-2043	29325	18344	-20895	53664	-203018
2033	20785	16108	-1739	29298	18070	-19014	49392	-202862
2034	20845	16188	-1464	29325	17827	-17143	45331	-202718
2035	20901	16257	-1214	29402	17613	-15289	41464	-202586
2036	10475	8156	-521	14753	8740	-6960	19347	-101297
PROMEDIO	19535	14009	-6217	30967	17393	-20013	83239	-202425

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.10.- Transporte de sedimentos en los puntos de control para el escenario 03 (con aporte de río a 1km al sur)

Tiempo (años)	Transporte potencial de sedimentos (m3/año)							
	P(20)	P(40)	P(60)	P(80)	P(100)	P(120)	P(140)	P(158)
2016	18606	10239	-16593	42779	-1392	12030	121772	-230793
2017	18802	10740	-15611	37713	10407	14574	110973	-222812
2018	18996	11542	-13577	33480	15430	-1983	121932	-214151
2019	19180	12235	-11782	32698	18095	-16386	123656	-210481
2020	19353	12835	-10248	32604	19765	-25112	120287	-208515
2021	19516	13353	-8947	32481	20716	-29922	115138	-207261
2022	19668	13800	-7837	32218	21154	-32322	109257	-206374
2023	19811	14187	-6883	31843	21244	-33212	103058	-205705
2024	19945	14520	-6054	31398	21108	-33128	96776	-205177
2025	20069	14807	-5327	30917	20837	-32403	90567	-204748
2026	20185	15055	-4683	30424	20491	-31251	84529	-204389
2027	20292	15267	-4109	29934	20110	-29816	78724	-204083
2028	20391	15449	-3592	29458	19721	-28194	73181	-203818
2029	20483	15605	-3125	29002	19342	-26450	67909	-203584
2030	20568	15736	-2699	28569	18982	-24633	62907	-203376
2031	20647	15848	-2310	28162	18649	-22773	58163	-203188
2032	20719	15941	-1952	27780	18344	-20895	53664	-203018
2033	20785	16018	-1622	27425	18070	-19014	49392	-202862
2034	20845	16081	-1315	27094	17827	-17143	45331	-202718
2035	20901	16132	-1030	26786	17613	-15289	41464	-202586
2036	10475	8085	-414	13291	8740	-6960	19347	-101297
PROMEDIO	19535	13975	-6177	30288	17393	-20013	83239	-202425

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.11.- Transporte de sedimentos en los puntos de control para el escenario 04 (con aporte de río y relleno en la zona norte)

Tiempo (años)	Transporte potencial de sedimentos (m3/año)							
	P(20)	P(40)	P(60)	P(80)	P(100)	P(120)	P(140)	P(158)
2016	18606	10239	-16593	42779	-1392	12030	-191244	-230793
2017	18802	10740	-15611	37713	10407	14570	-275171	-222812
2018	18996	11542	-13577	33480	15430	-2136	-256765	-214151
2019	19180	12235	-11782	32698	18095	-17460	-225339	-210481
2020	19353	12835	-10248	32604	19765	-28561	-197750	-208515
2021	19516	13353	-8947	32481	20716	-37391	-173462	-207261
2022	19668	13800	-7837	32218	21154	-45293	-151946	-206374
2023	19811	14187	-6883	31843	21244	-52902	-132835	-205704
2024	19945	14520	-6054	31398	21108	-60490	-115791	-205176
2025	20069	14807	-5327	30917	20837	-68169	-100500	-204744
2026	20185	15055	-4683	30424	20491	-75974	-86689	-204380
2027	20292	15267	-4109	29934	20110	-83907	-74130	-204064
2028	20391	15449	-3592	29458	19721	-91949	-62636	-203784
2029	20483	15605	-3125	29002	19341	-100078	-52059	-203528
2030	20568	15736	-2699	28569	18981	-108267	-42276	-203288
2031	20647	15848	-2310	28162	18647	-116489	-33188	-203057
2032	20719	15941	-1952	27780	18341	-124719	-24714	-202831
2033	20785	16018	-1622	27425	18064	-132936	-16783	-202603
2034	20845	16081	-1315	27094	17817	-141120	-9340	-202372
2035	20901	16132	-1030	26786	17598	-149254	-2335	-202134
2036	10475	8085	-414	13291	8730	-77696	1336	-101025
PROMEDIO	19535	13975	-6177	30288	17391	-70866	-105887	-202337

Fuente: Elaboración propia

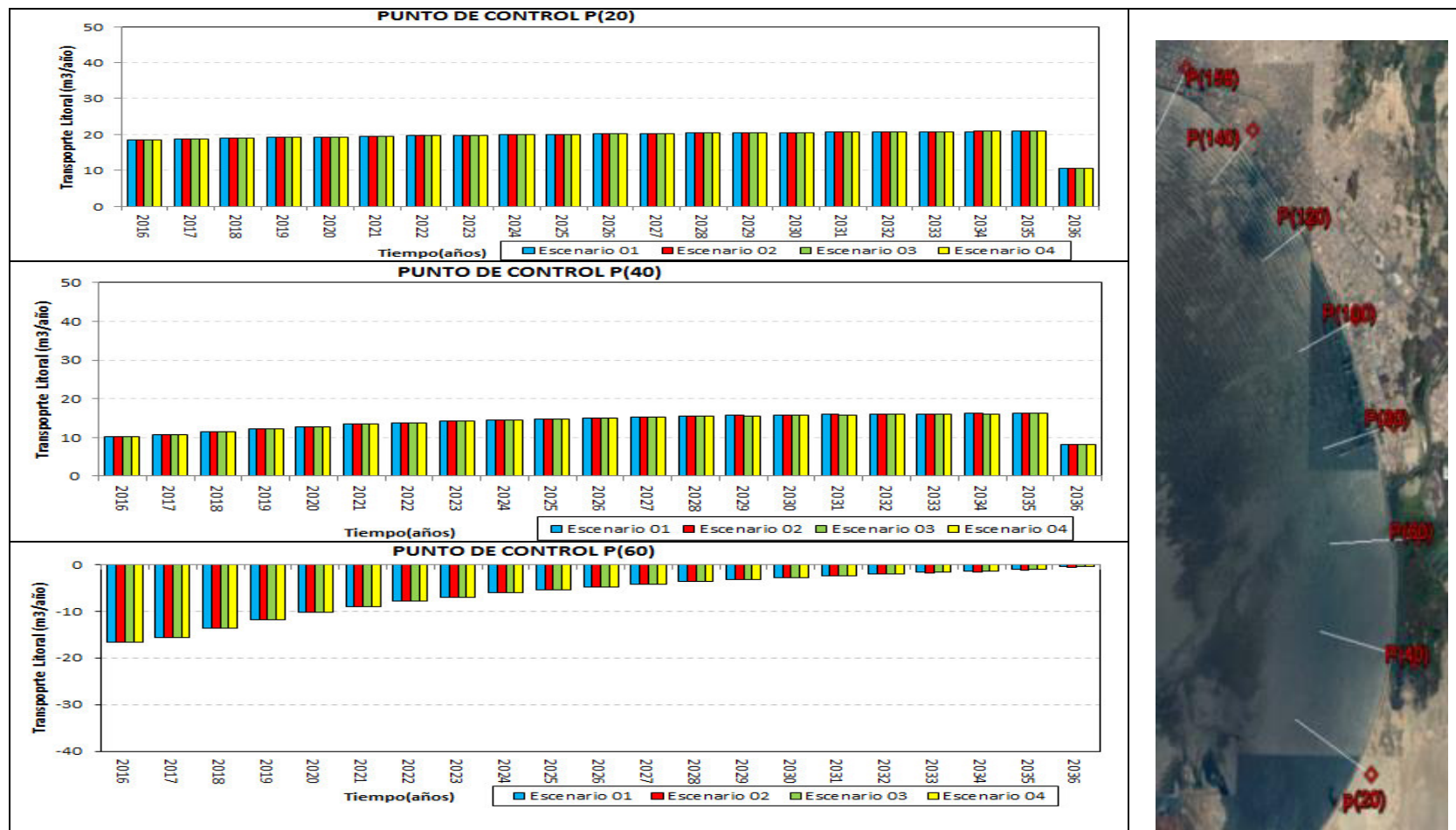


Figura 5.34.- Transporte de sedimentos anuales en los puntos de control P(20), P(40) y P(60) . Fuente: Elaboración propia

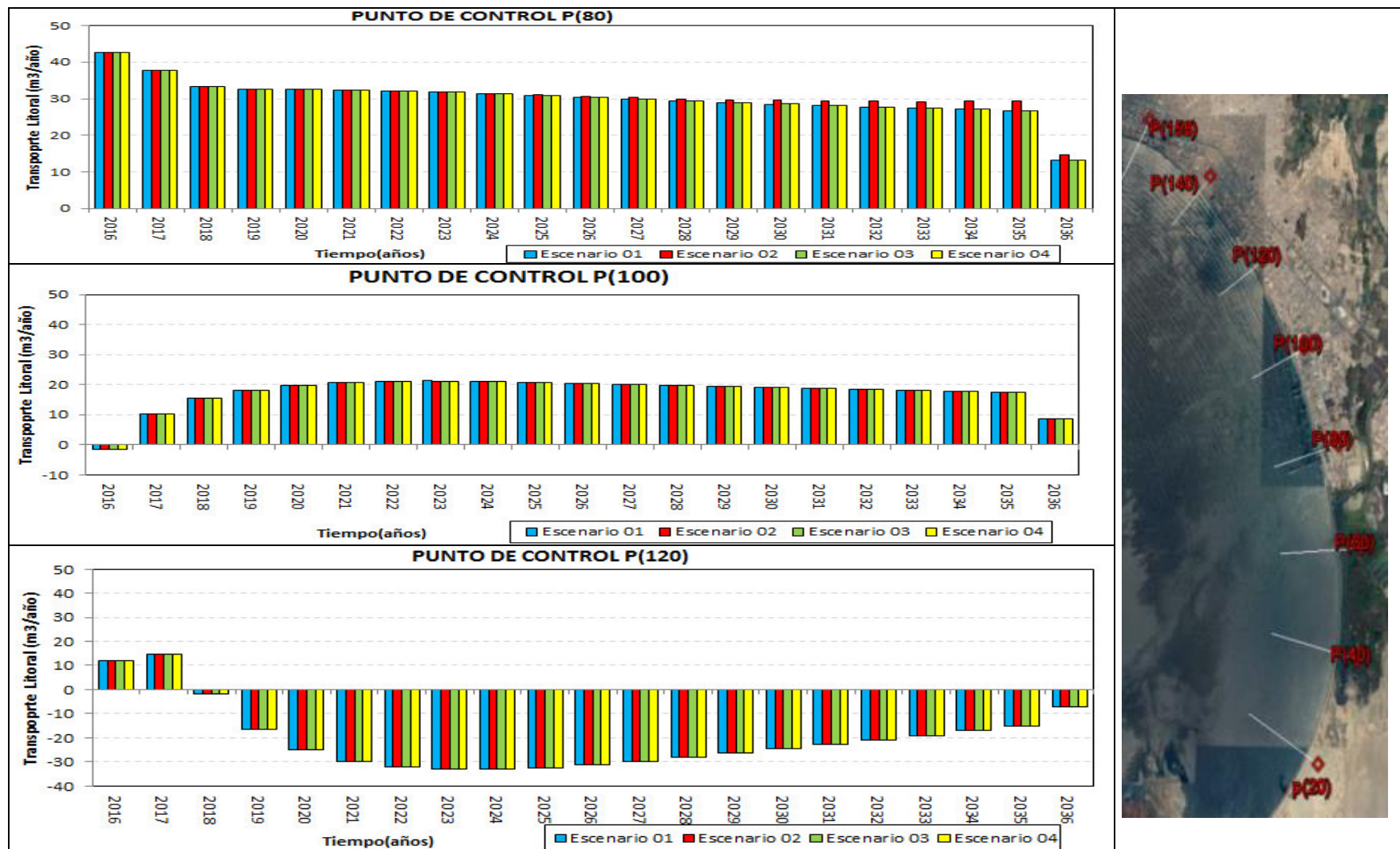


Figura 5.35.- Transporte de sedimentos anuales en los puntos de control P(80), P(100) y P(120). Fuente: Elaboración propia

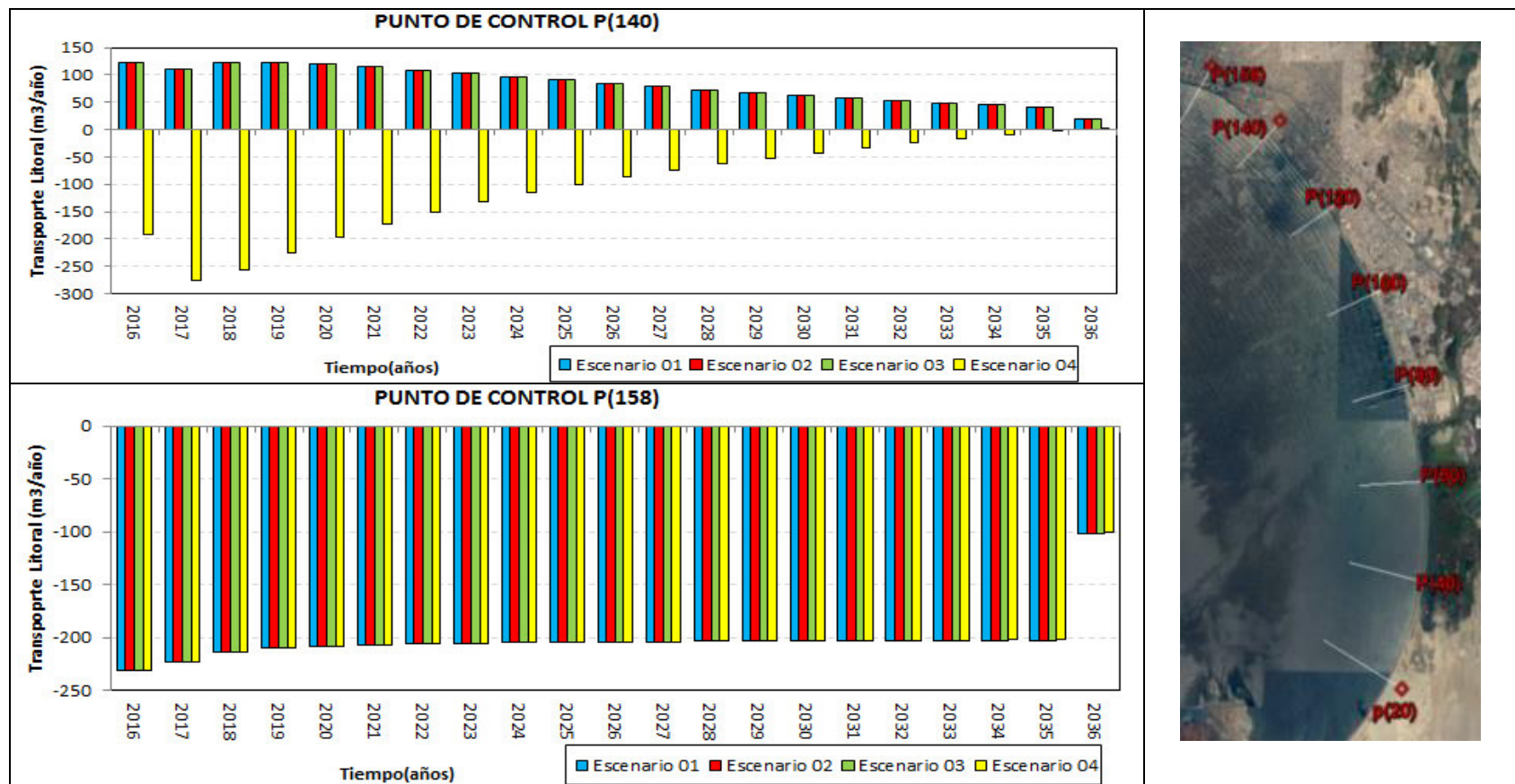


Figura 5.36.- Transporte de sedimentos anuales en los puntos de control P(140) y P(158) . Fuente: Elaboración propia

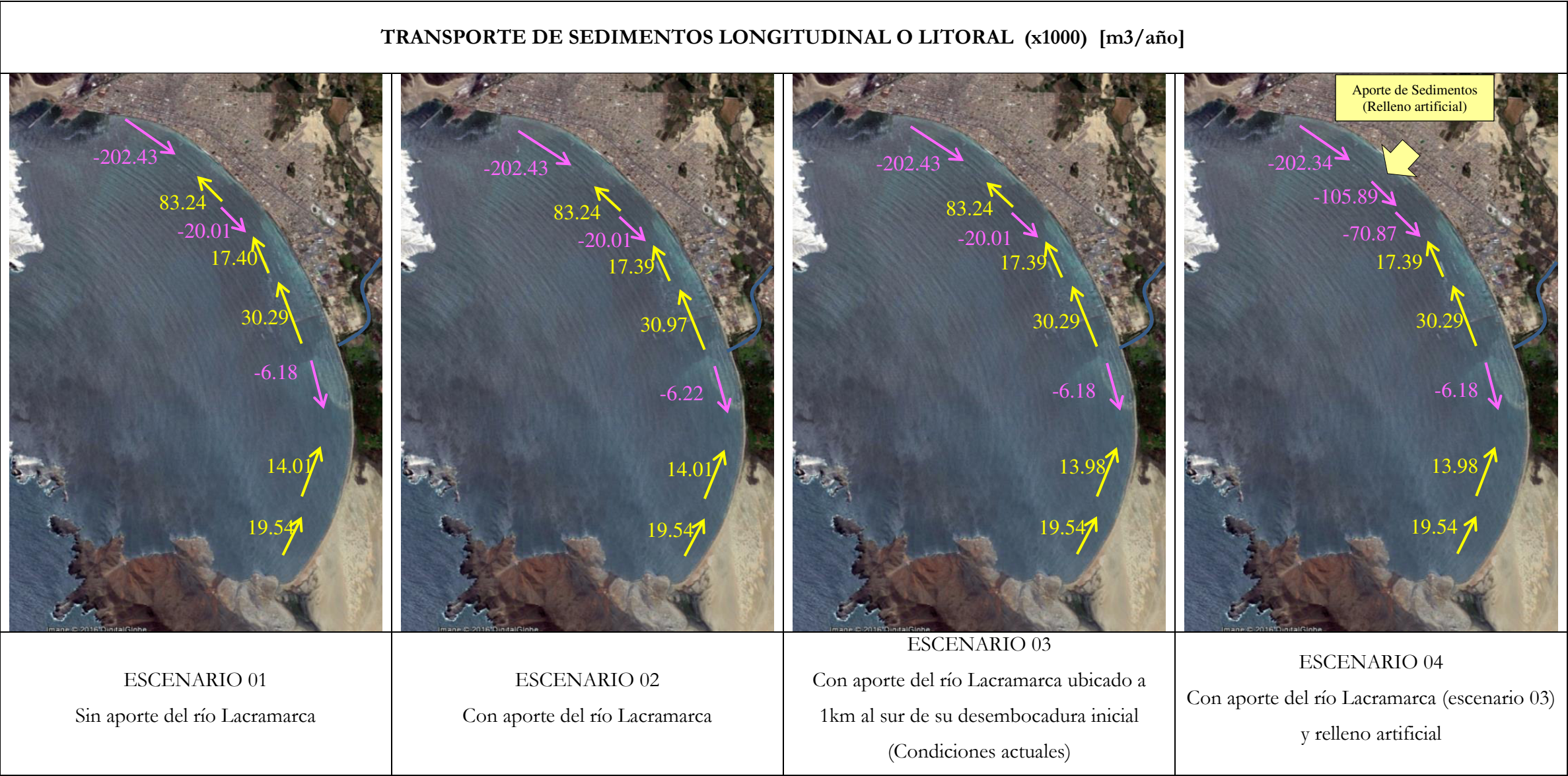


Figura 5.37.- Representación del Transporte de sedimentos litoral para cada escenario (x1000) [m3/año]. Fuente: Elaboración propia

5.3. Análisis y discusión

Los resultados de los escenarios estudiados, han revelado la importancia que tiene el río Lacramarca sobre los procesos de erosión y sedimentación que se presentan en la bahía, ya que este se encarga de mantener el equilibrio costero en la zona de estudio aportando sedimentos de manera continua durante su régimen hidrológico, tal como se evidenció en los escenarios 01 y 02, donde se ha observado que la ausencia del río (escenario 01) hace que de manera general toda la bahía esté sometida a procesos de erosión debido a la falta de sedimentos de ingreso a la bahía, este sería el escenario más desfavorable que se presentaría en la zona de estudio.

Por otro lado, al incluir el río Lacramarca en su antigua posición de desembocadura (escenario 02) la zona sur y parte de la zona central presentaron procesos de sedimentación lo cual hace que se generen grandes extensiones de playas, incluso las imágenes aéreas revelan que los muelles ubicados en la zona central se van reduciendo debido a la sedimentación ocasionada.

Es importante mencionar que se ha evidenciado que cualquier cambio que se produzca sobre la desembocadura del río (escenario 03) alterará los procesos de erosión y sedimentación, ya que como se ha observado el cambio de la desembocadura del río hacia el sur provoca un déficit mayor de sedimentos hacia la zona centro y norte de la bahía, que responden con procesos de erosión ante los cambios de la desembocadura a del río hacia el sur.

A pesar de la importancia del río Lacramarca en la zona de estudio, no se ha encontrado mucha información referente a monitoreos de caudales de manera continua o concentraciones de sedimentos del río, limitándose sólo a información muy puntual, por lo que sería necesario efectuar mediciones más continuas, sobre todo de caudales y concentración de sedimentos, que permita calcular los caudales sólidos de transporte de sedimentos debido a la descarga del río. Esto permitirá mejorar el conocimiento de la dinámica de este río y su influencia sobre los procesos de erosión y sedimentación sobre toda el área de estudio.

Asimismo, queda claro que la zona norte de la bahía es la que más se encuentra expuesta a los procesos de erosión y esto está asociado a que en dicho sector se presenta la mayor altura de oleaje en toda la bahía. Por otro lado, sumado a lo descrito anteriormente, este déficit de sedimentos hacia la zona norte, puede estar asociado a que en la zona sur la altura de oleaje es menor en toda la bahía y por lo tanto la capacidad de transporte no es capaz de llevar los

sedimentos hacia la zona norte. Por lo tanto, en este sector, al no llegar el sedimento de manera continua, el relleno artificial (escenario 04) se presenta como una alternativa a este problema de erosión, sin embargo, a la fecha este problema ha sido solucionado con un enrocado ubicado en el borde costero.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Las conclusiones del estudio son las siguientes:

➤ Modelo desarrollado

- El modelo desarrollado ha sido capaz de representar de manera adecuada la dinámica de la evolución de la línea de costa que se ha presentado tanto en los casos teóricos analizados como en la aplicación real al estudio de la dinámica de erosión y sedimentación de la bahía.
- Una de sus principales ventajas es la capacidad de poder ser acoplado a cualquier modelo de olas, así como trabajar sobre grillas curvilíneas, pudiendo modelar áreas un poco complejas.
- Algunas limitaciones, es que el modelo es muy sensible a la definición de las condiciones iniciales y de frontera de olas, por lo que es necesario que el modelo de olas empleado requiera de una buena correlación para su uso, así mismo este modelo, no contempla el efecto de cambio climático, tsunamis, ni cambios biogeoquímicos en la bahía.

➤ Olas en aguas costeras:

- Debido a la configuración morfológica de la bahía, el oleaje dentro de ella es muy bajo, produciéndose alturas de olas entre 0.5 a 1.0m, siendo la zona norte de la bahía la más afectada por el oleaje, mientras que la zona sur en la que menos se ve afectada por el oleaje.
- El resultado del modelo muestra un buen grado de aproximación con lo observado con el ológrafo, con una correlación que puede alcanzar los 0.96. Sin embargo, se mostró que los mayores porcentajes de errores se presentan en los oleajes mínimos, donde los resultados del modelo subestiman los valores del oleaje en mención a lo

observado, mientras que, en los promedios y máximos, el modelo tiende a sobreestimar ligeramente la altura de ola.

➤ Aplicación del modelo desarrollado a casos teóricos

- El modelo desarrollado ha sido capaz de representar los casos teóricos, espigón, rompeolas y relleno artificial, mostrando en cada uno de los casos una buena aproximación de los resultados, por lo que el modelo quedo apto para ser aplicado a un caso real.
- El modelo fue capaz de representar el relleno artificial propuesto, debido a la inclusión de una descarga de sedimentos en costa, que puede ser producido por un río o por la intervención del hombre.

➤ Variación de la línea de costa y transporte de sedimentos en la bahía El Ferrol

- El escenario 01 ha revelado la importancia del río Lacramarca en los procesos de erosión y sedimentación en la bahía, ya que, al no incluirlo, la tendencia general de la bahía es a erosionar.
- Cuando se considera el aporte de sedimentos del río Lacramarca (escenario 02), se observa que la zona sur y parte de la zona centro se mantiene estable o sedimenta, sin embargo, la zona norte siguió mostrando los problemas de erosión existente.
- En el escenario 03 donde se considera un desplazamiento de la desembocadura del río a 1km al sur (respecto al escenario 02), mostro que la zona sur mantiene la tendencia a sedimentar, mientras que la zona centro cambió su tendencia por erosión, y la zona norte sigue con procesos de erosión. Esto revela que cualquier alteración en la desembocadura del río puede cambiar la tendencia de erosión o sedimentación en la bahía.
- Así mismo la validación del modelo con las imágenes de Google presentaron la misma tendencia de las tasas de erosión o sedimentación en la bahía.

- El escenario 04, muestra que el relleno artificial puede ser considerado como un método para proteger la zona norte contra los procesos de erosión, ya que se ha logrado alcanzar una extensión de playa de hasta 110 m donde la playa estaba erosionando.
- De forma general se observa que el transporte longitudinal de la bahía muestra una tendencia hacia el norte, con excepción de la zona de la descarga del río Lacramarca y la zona norte de la bahía, que están asociadas a procesos de erosión.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones del estudio son las siguientes:

- Se recomienda instalar un ológrafo en la bahía por 1 año, con la finalidad de cuantificar con mayor exactitud el grado de acierto del modelo, y verificar si el modelo logra representar adecuadamente los valores máximos y mínimos de alturas de olas.
- El modelo desarrollado de variación de línea de costa puede ser complementado con el desarrollo de un modelo de variación de fondo, el cual permita cuantificar la cantidad de sedimento que estaría erosionando o sedimentando en fondo, debido a la dinámica marina.
- A pesar de que se ha conseguido que el modelo de variación de línea de costa funcione con el flujo medio de energía para modelar escalas de corto, mediano y largo plazo (de manera separa una de otra). Es necesario para futuros trabajos, se desarrolle una subrutina que permita ingresar una serie de tiempo de olas que permita modelar estas tres escalas de manera combinada, y poder determinar por ejemplo las variaciones mensuales, estacionales y multianuales de la variación de la línea de costa.

BIBLIOGRAFIA

- Camus, P., Mendez, F., Medina, R., & Cofiño, A. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 453-462.
- Dean, R., & Dalrymple, R. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Delft Hydraulics. (1996). *Estudios costeros de la Bahía de Miraflores*.
- DELTARES. (2014). *Simulation of short-crested waves with SWAN*. Delft: Deltares.
- DHN, Dirección de Hidrografía y Navegación (1995). *Dirección de Hidrografía y Navegación - Marina de Guerra del Perú*.
- DHN, Dirección de Hidrografía y Navegación (2003). *Estudio Oceanográfico en la bahía Ferrol - Chimbote*.
- DHN. Dirección de Hidrografía y Navegación (2010). *Estudios costeros de la Costa Verde*. Lima.
- DHN, Dirección de Hidrografía y Navegación, (2008). *Estudio de la Erosión y Sedimentación en la Bahía Ferrol – Chimbote*.
- DHN-N°223. (2000). Dirección de Hidrografía y Navegación - Marina de Guerra del Perú. *Carta batimétrica N°223*.
- DHN-N°2236. (1995). Dirección de Hidrografía y Navegación - Marina de Guerra del Perú. *Carta batimétrica N°2236*.
- Fernández Díez, P. (2006). *Energía de las olas*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria.
- Fredsoe, J., & Deigaard, R. (1992). *Mechanics of Coastal Sediment Transport*. World Scientific.
- G.I.O.C. Dinamicas, G. d. (2000). *Documento de referencia: Dinamicas*.
- GEBCO (2014). *The General Bathymetric Chart of the Oceans*.
- Guzmán Zorrilla, E. (2006). *Modelamiento de la dispersión de contaminantes pasivos en la bahía Ferrol*.
- Hanson, H., & Kraus, N. (1989). *GENESIS: Generalized model for simulating shoreline Change*.
- Kamphuis. (2002). Alongshore transport of sand. *Coastal Engineering Conference*.
- Liu, P., & Losada, I. (1984). *El modelado matemático de la propagación del oleaje en Ingeniería de Costas*.
- Macdonel, G., Herrejón, L., Pizá, J., & López, H. (1999). *Ingeniería Marítima y Portuaria*. Alfaomega.
- Martínez Ramos, S. (2013). Estudio morfodinámico de una playa lineal. Aplicación al caso de Gandía. Universidad Politécnica de Valencia.

- Minguez, R., Espejo, A., Tomas, A., Mendez, F., & Losada, I. (2011).** Directional calibration of wave reanalysis databases using instrumental data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*.
- Munk, W. (1950).** *Origin and Generation of Waves*.
- NDBC - Boya 32012. (s.f.).** *National Data Buoy Center*. Obtenido de http://www.ndbc.noaa.gov/historical_data.shtml
- NOAA - WWATCH, M. (s.f.).** *Modelo Wave Watch*. Obtenido de <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>
- NOAA. (2017).** *Environmental Modeling Center*.. Obtenido de <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>
- Pelnard-Considere, R. (1956).** Essai de theorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sables et de galets. *IV'ieme Journee de L'Hydraulique Les engenes de la mer*, 289.
- Phillips, N. A. (1957).** A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *Journal of Meteorology* 14, 184–185.
- RAE. (2014).** *Diccionario de la lengua española*. Tricentenario.
- Ramos Orlandino, C. C. (2014).** *Simulación Numérica de la Modificación de las olas en la Bahía de Miraflores*. Lima.
- Roelvink, J. A. y D. J. R. Walstra. (2004).** Keeping it simple by using complex models. *Advances in Hydro-Science and Engineering. Vol. VI*, 12.
- Shemdin, O., Hasselmann, K., Hsiao, S., & Herterich, K. (1978).** *Nonlinear and Linear Bottom Interaction Effects in Shallow Water*.
- The SWAN team (2006).** *Delft University of Technology*. Obtenido de <http://www.swan.tudelft.nl>
- TuDelft, D. (2016).** *SWAN*. Obtenido de <http://www.swan.tudelft.nl>
- USACE, & U.S. Army Corps of Engineers. (2002).** *Coastal Engineering Manual*.

ANEXO

Anexo I

1.-Resultado de la modelación de olas en el punto (Ológrafo).

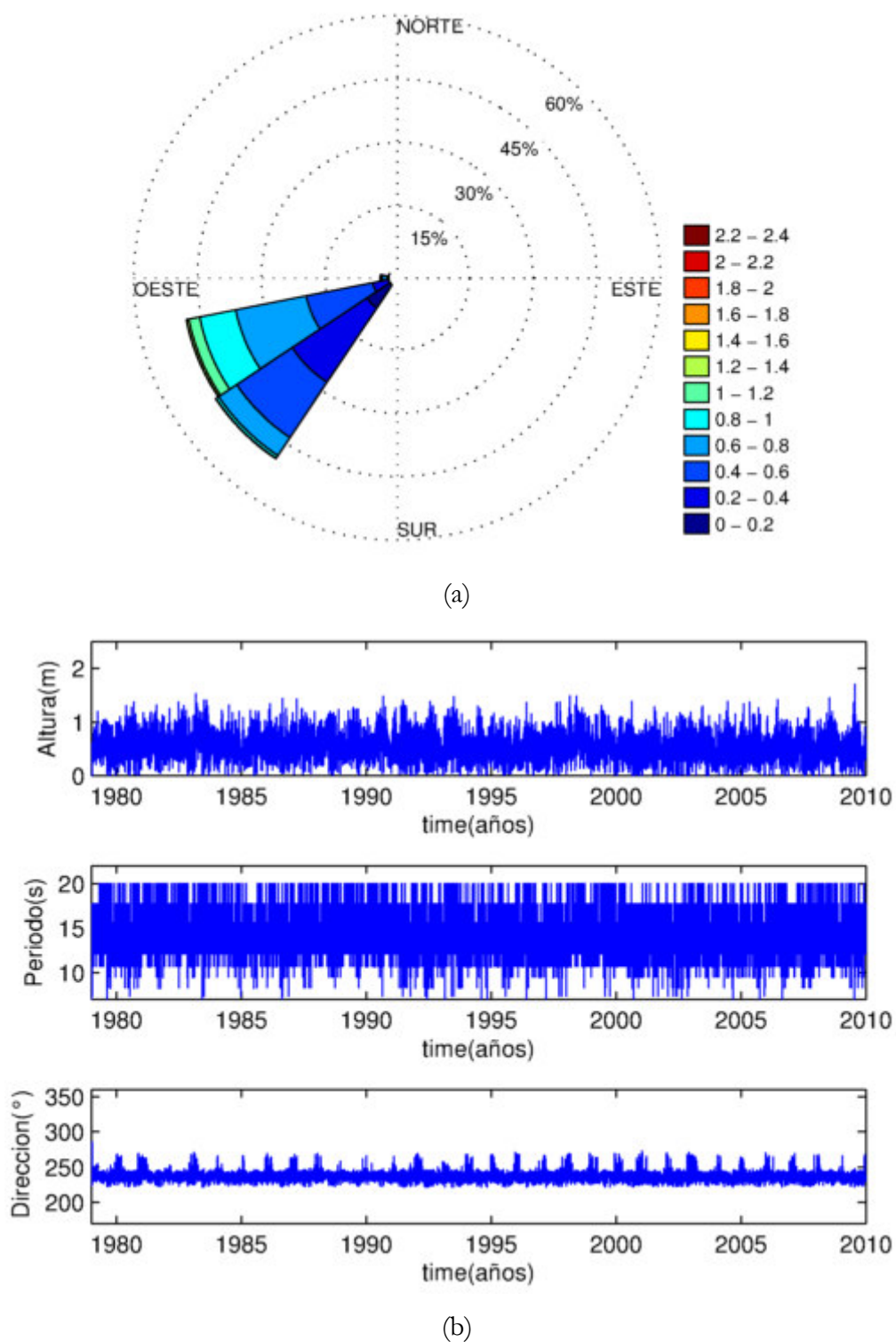
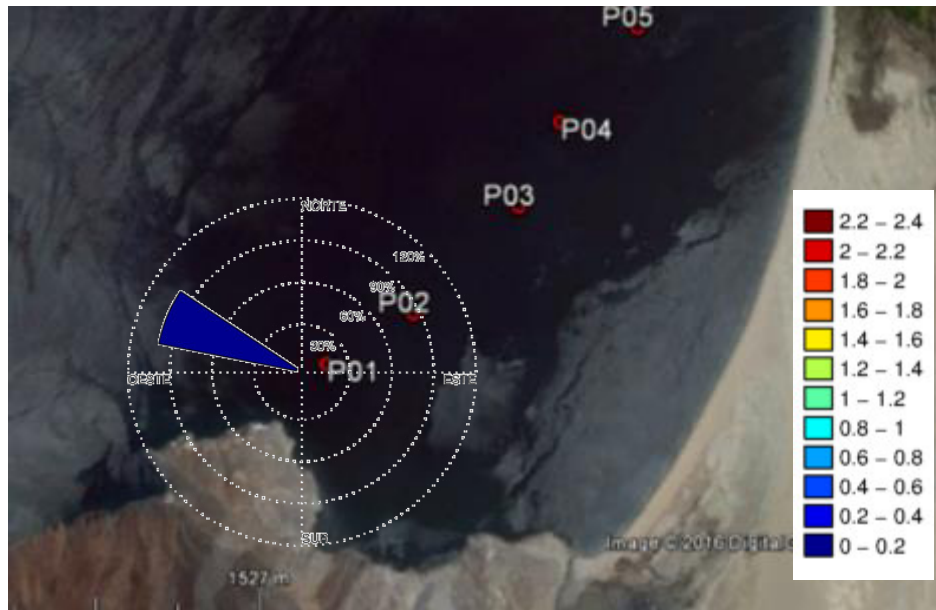
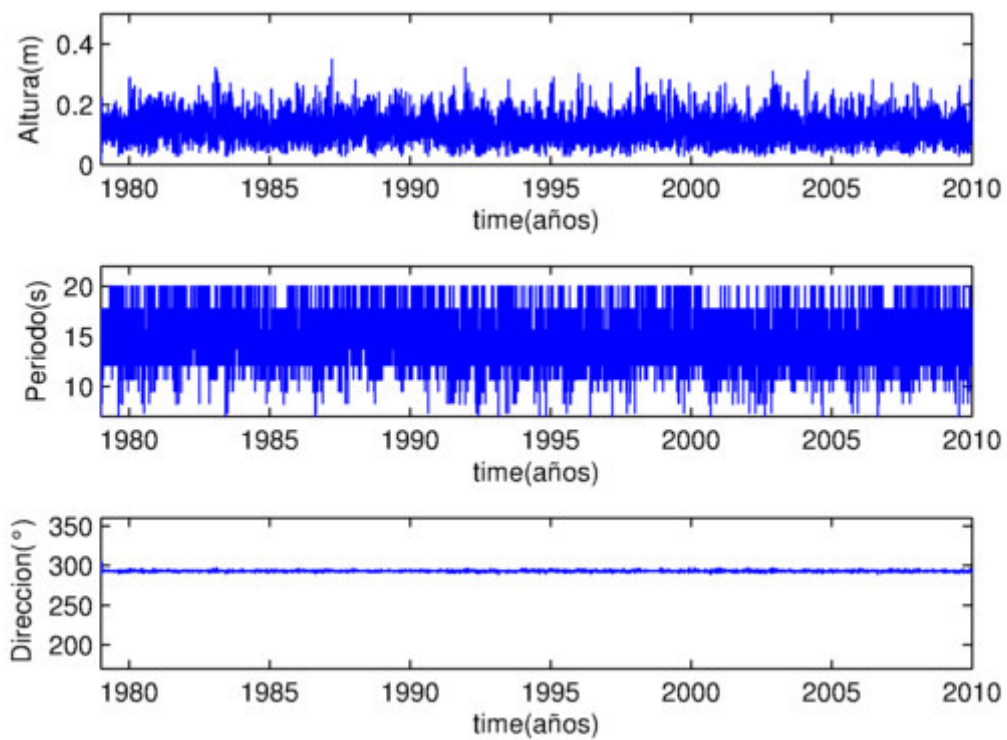


Figura 59.- Olas en el punto Ológrafo. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

2.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P01).



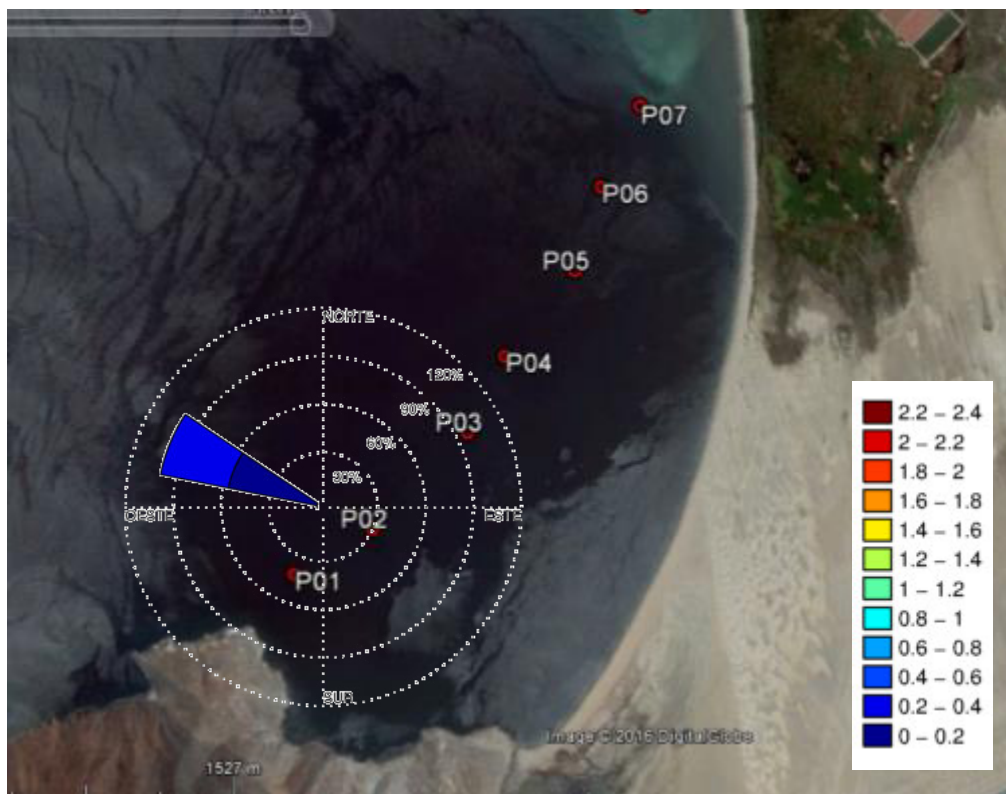
(a)



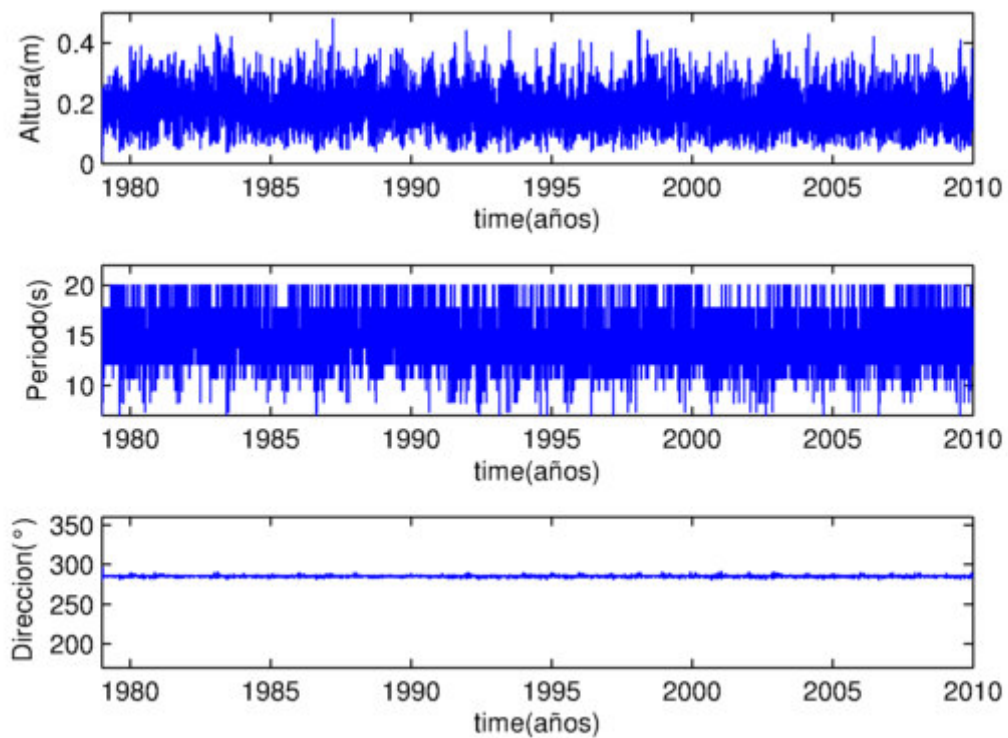
(b)

Figura 47.- Olas en el punto P01. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

3.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P02).



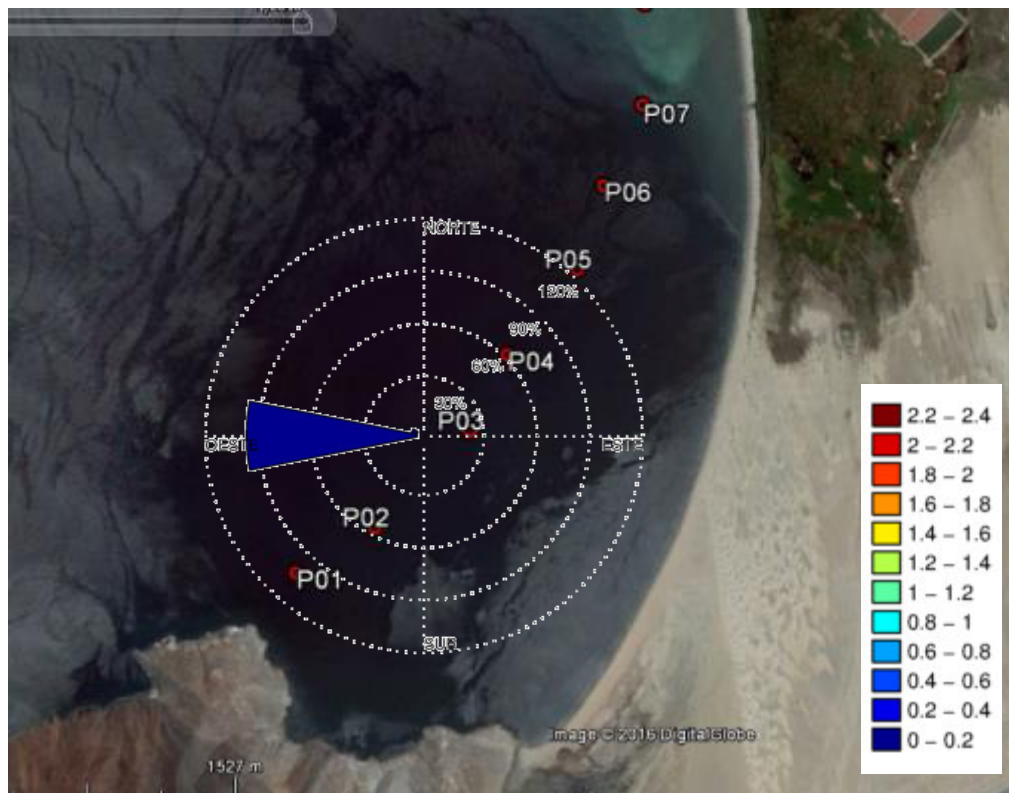
(a)



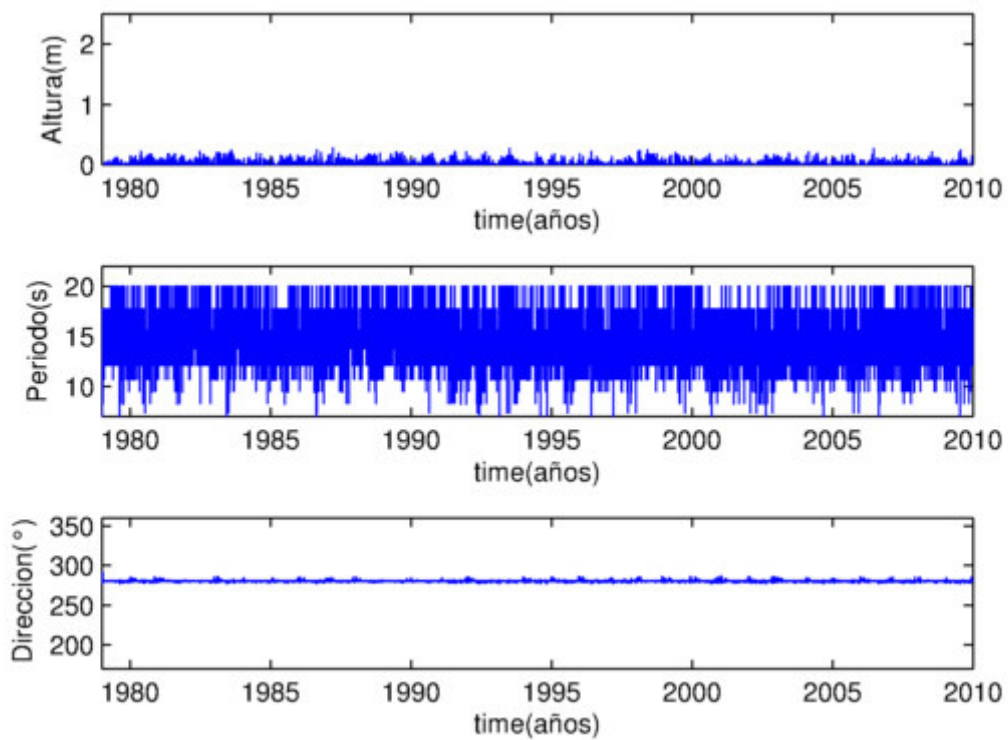
(b)

Figura 48.- Olas en el punto P02. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

4.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P03).



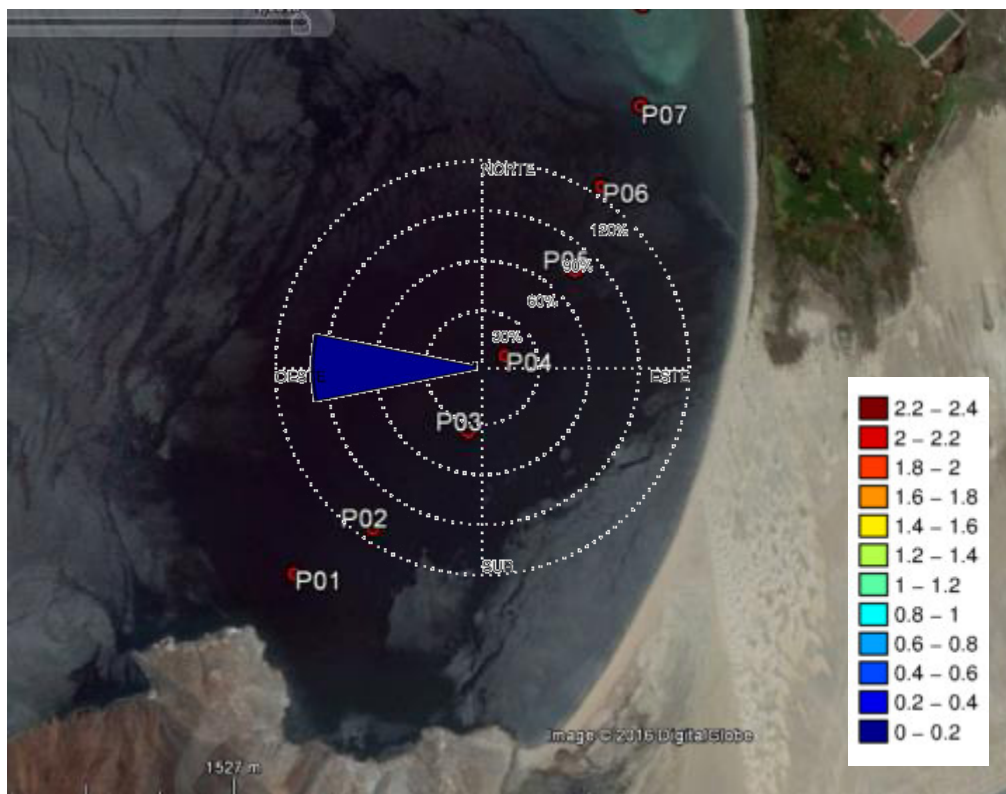
(a)



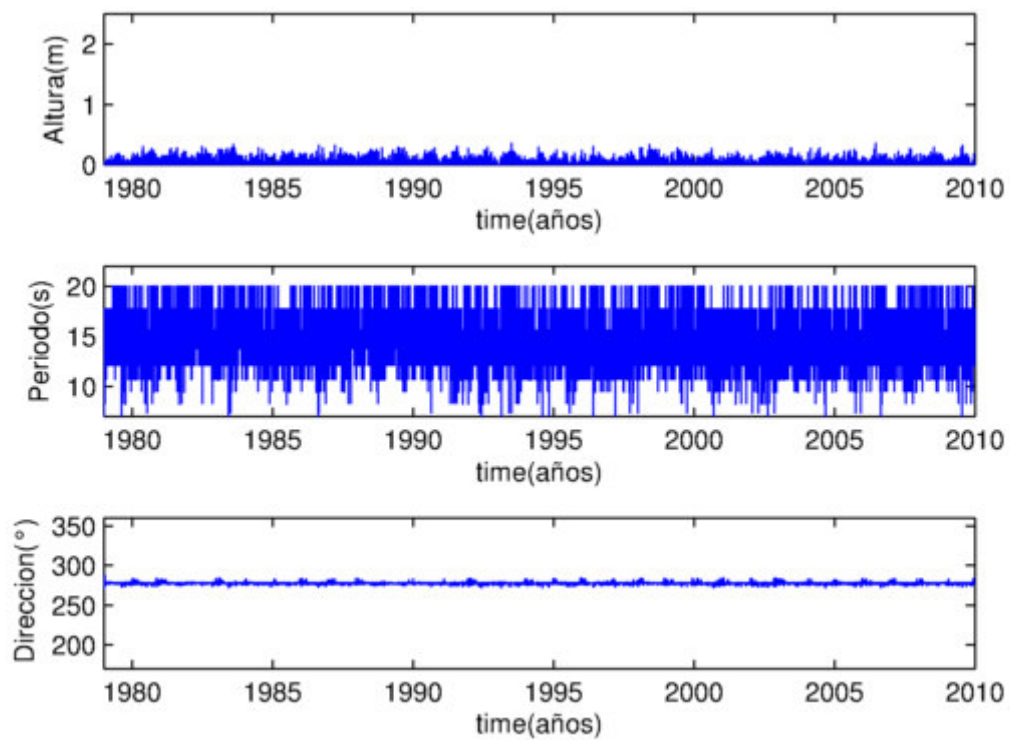
(b)

Figura 49.- Olas en el punto P03. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

5.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P04).



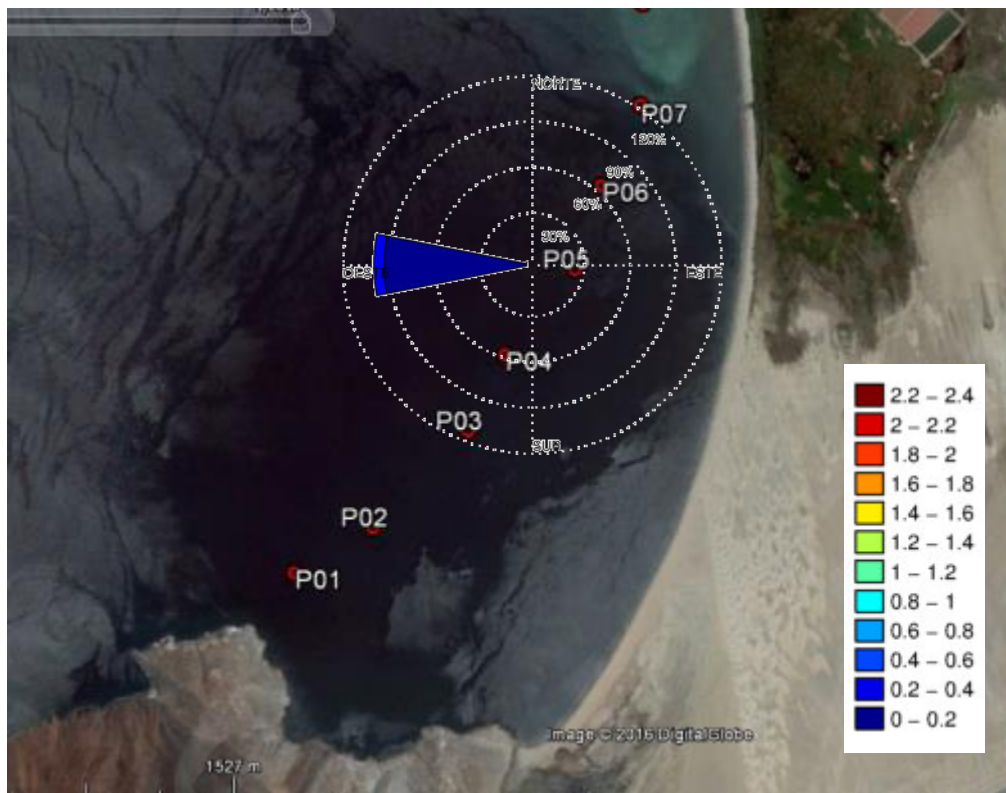
(a)



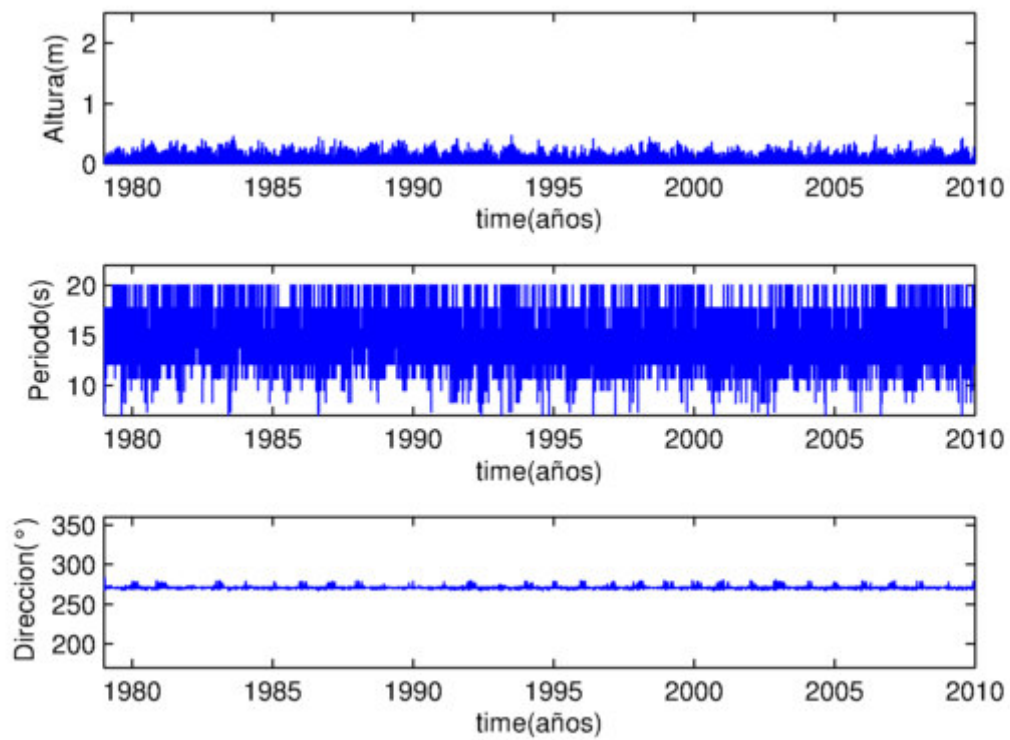
(b)

Figura 50.- Olas en el punto P04. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

6.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P05).



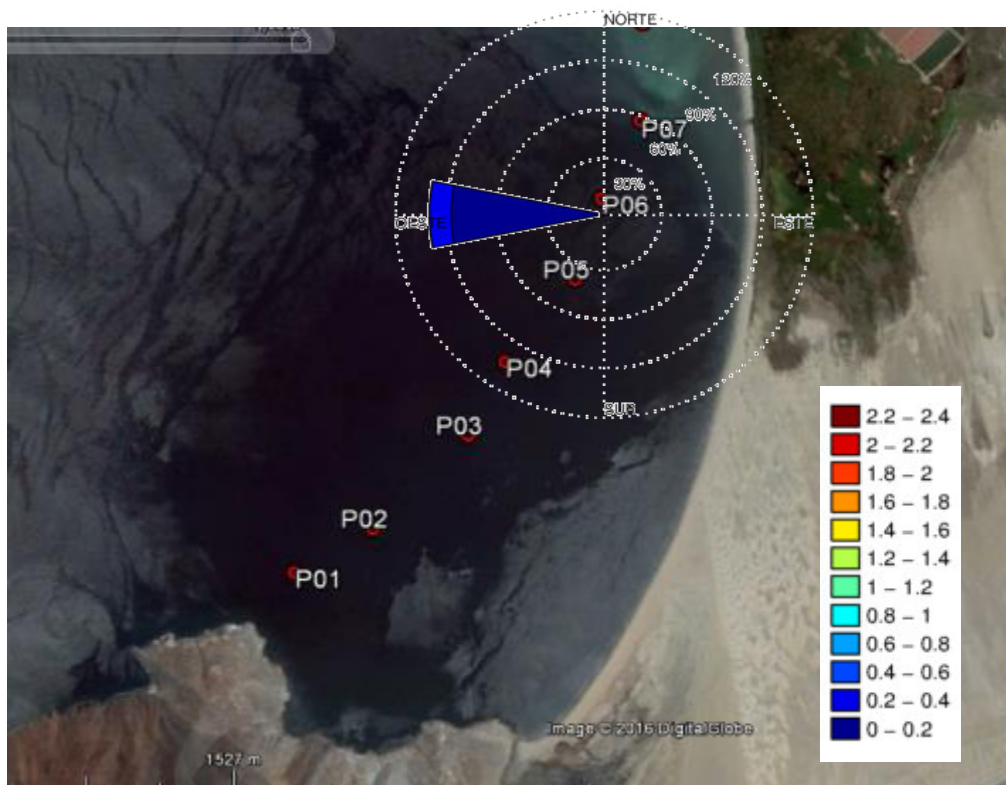
(a)



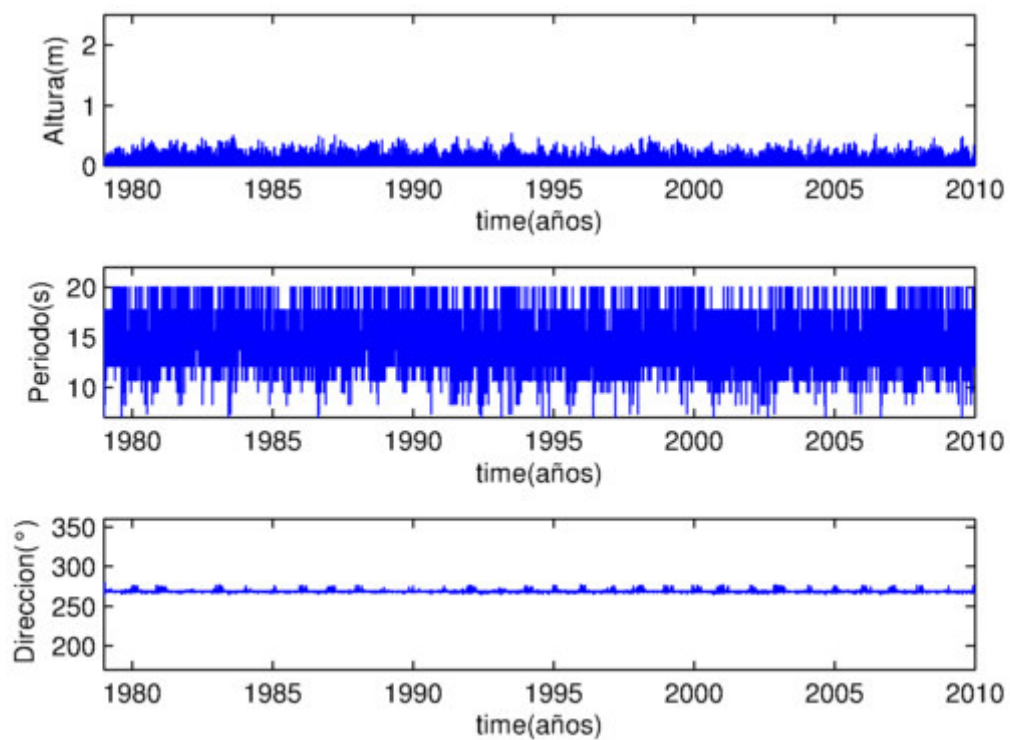
(b)

Figura 51.- Olas en el punto P05. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

7.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P06).



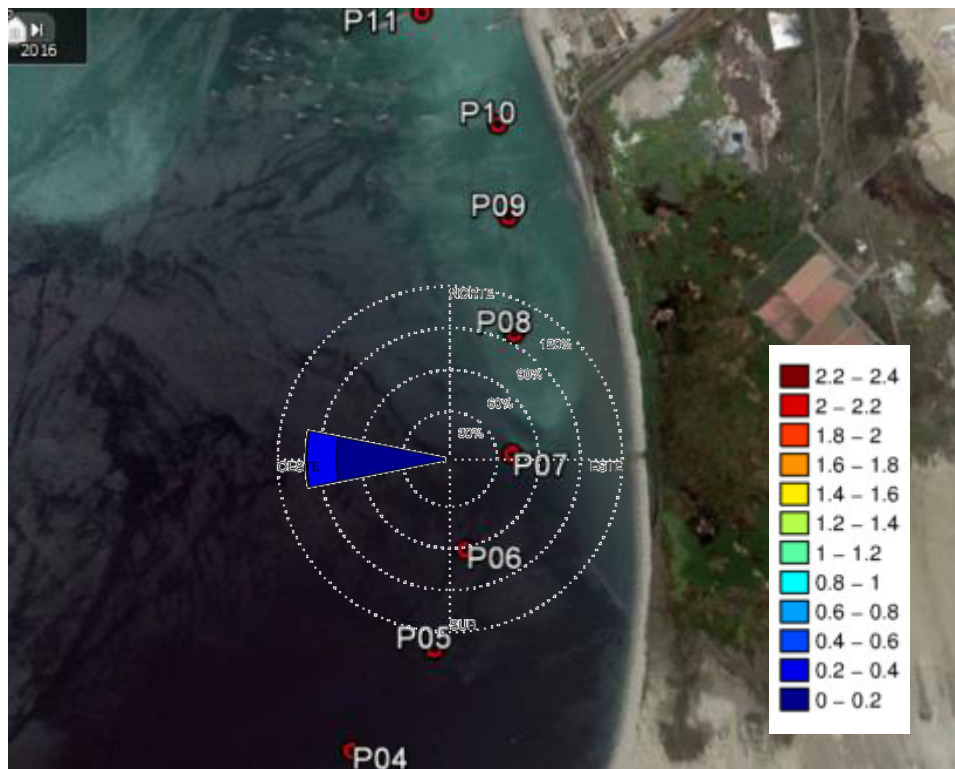
(a)



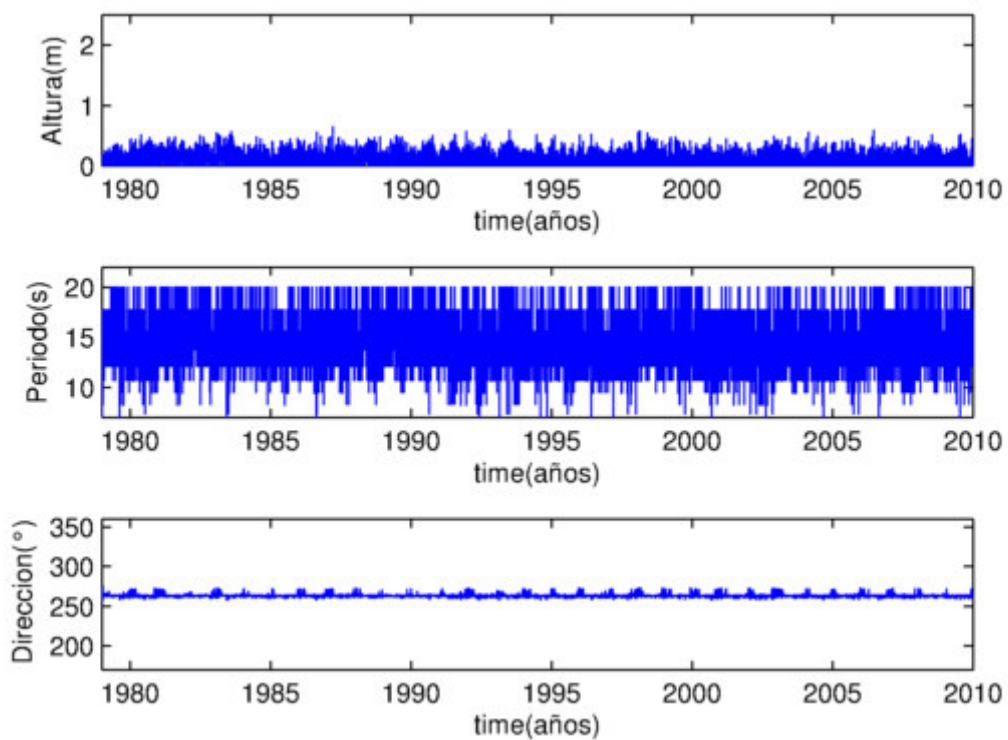
(b)

Figura 52.- Olas en el punto P06. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

8.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P7).



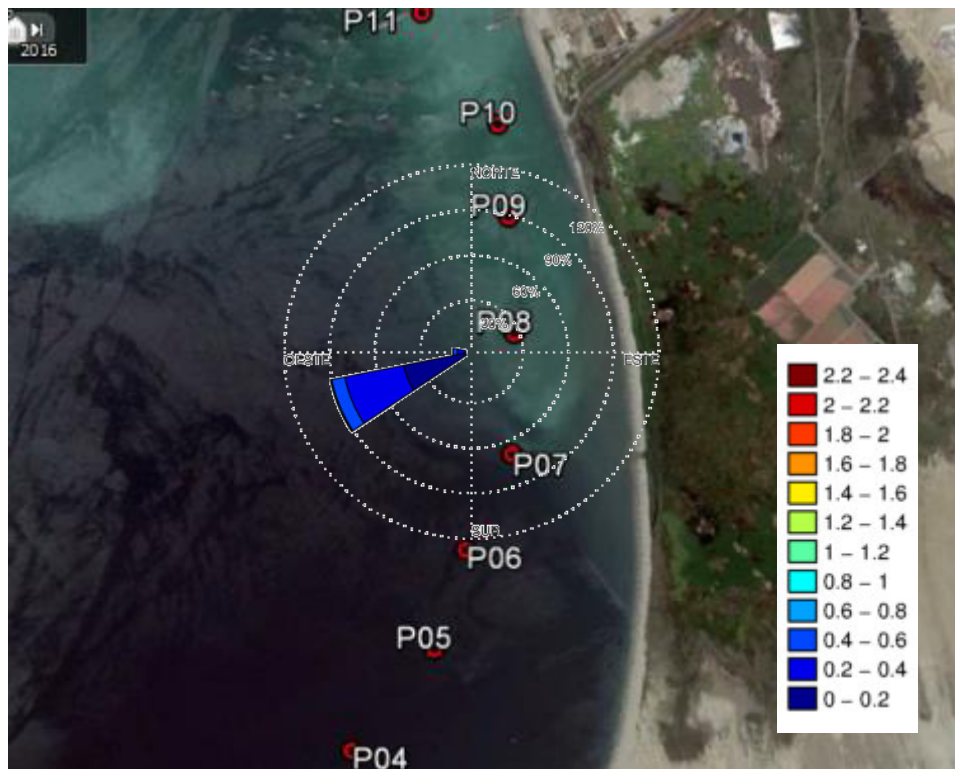
(a)



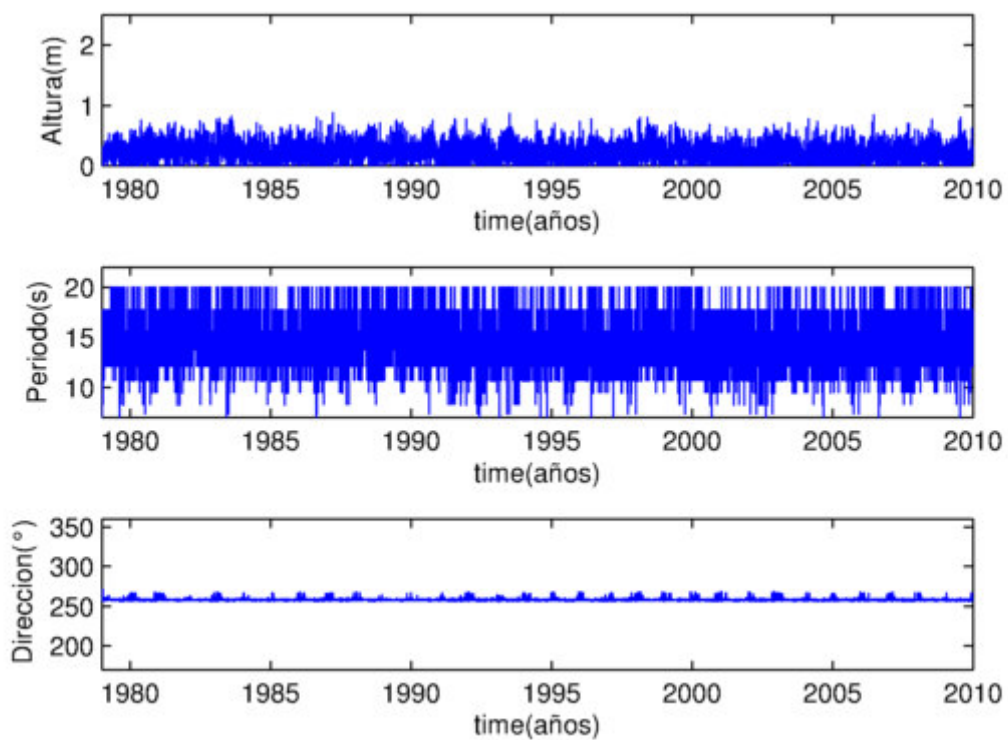
(b)

Figura 53. - Olas en el punto P7. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

9.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P8).



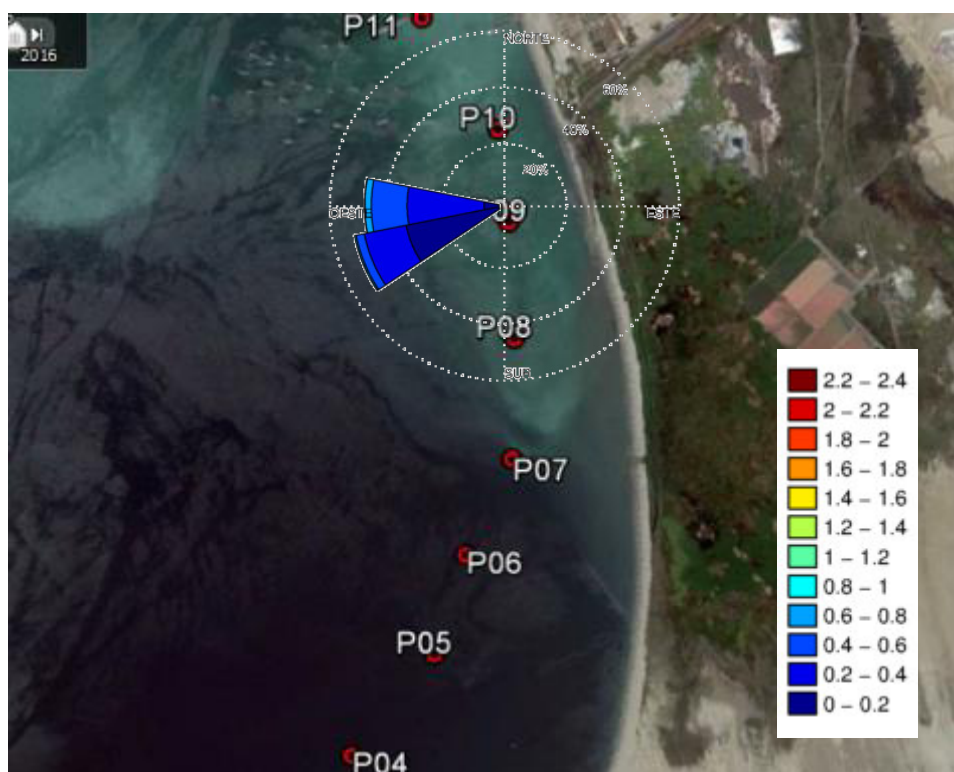
(a)



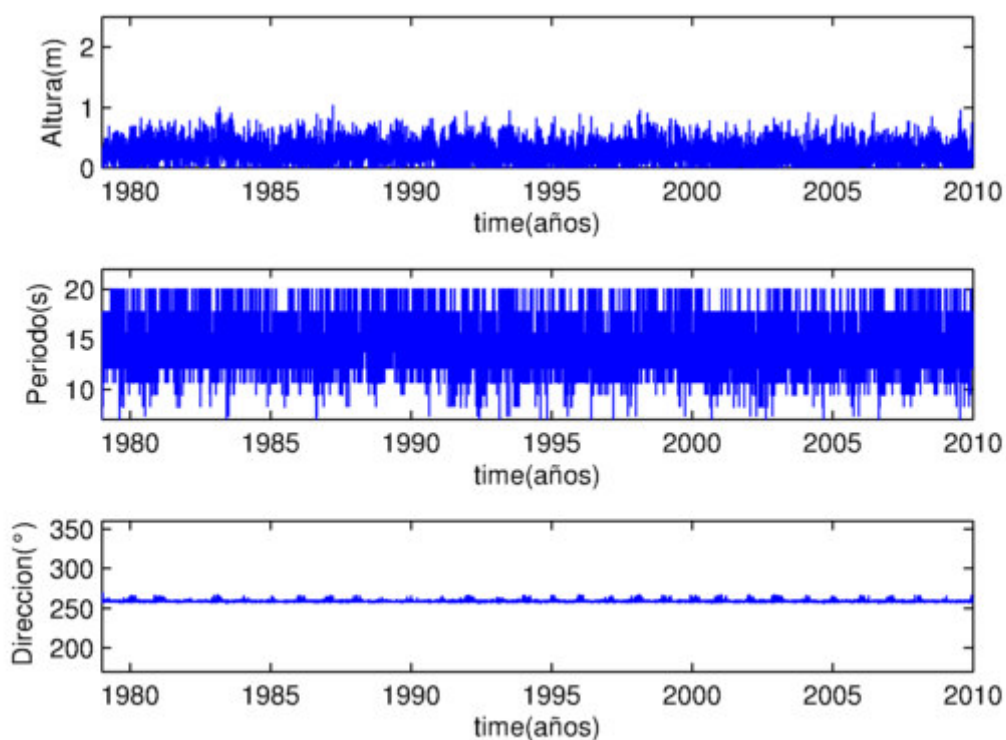
(b)

Figura 54.- Olas en el punto P8. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

10.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P9).



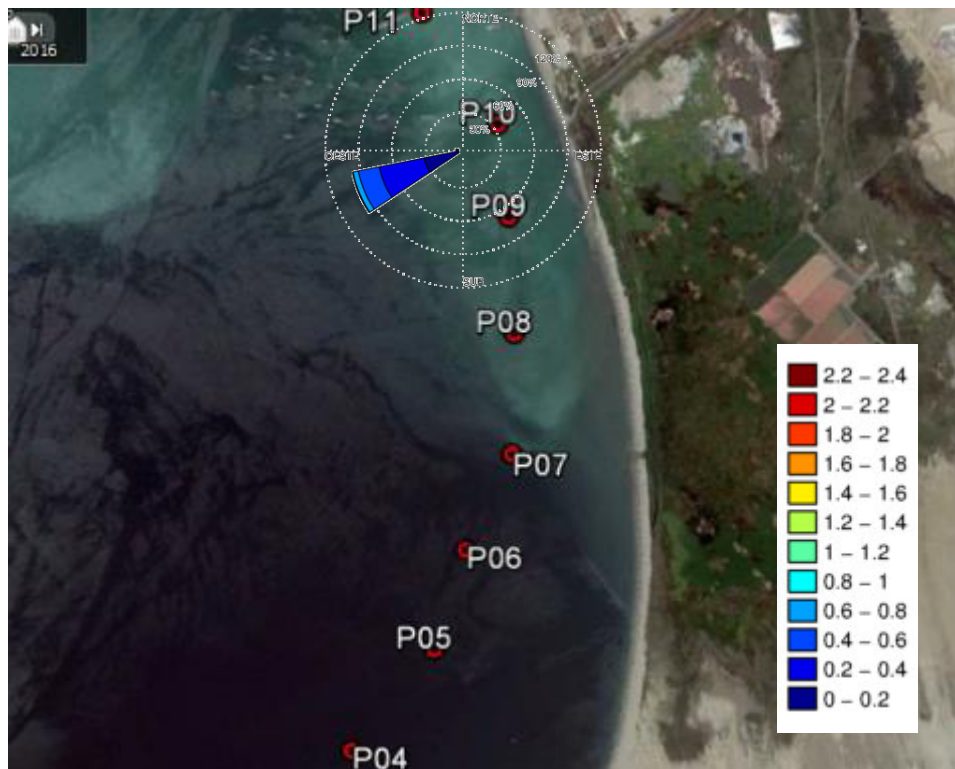
(a)



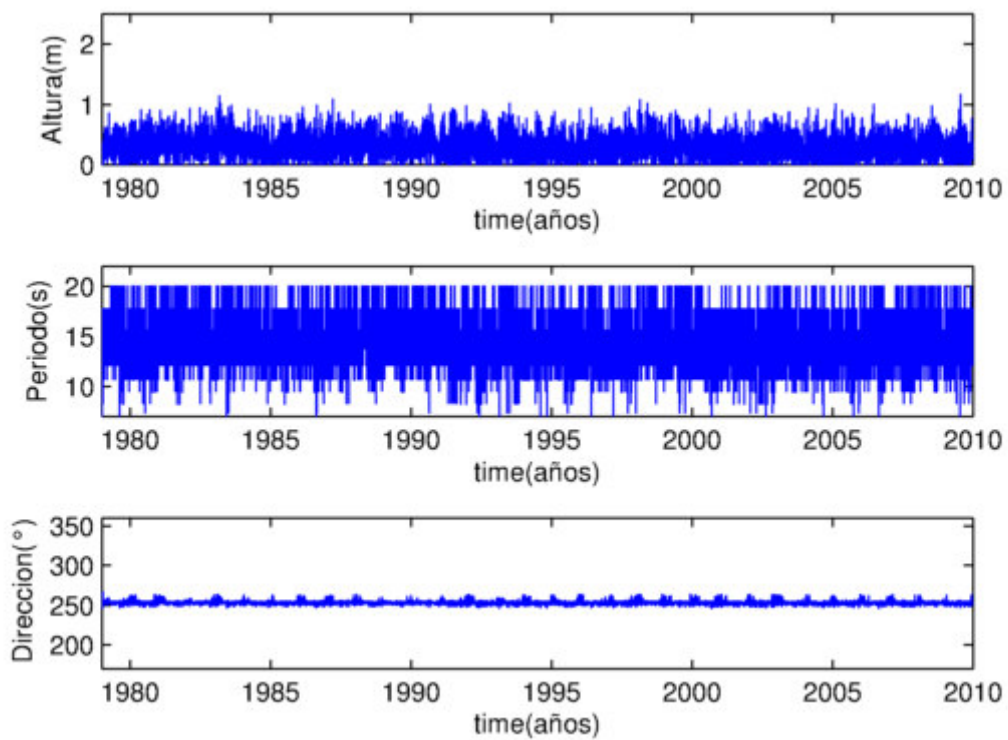
(b)

Figura 55.- Olas en el punto P9. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

11.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P10).



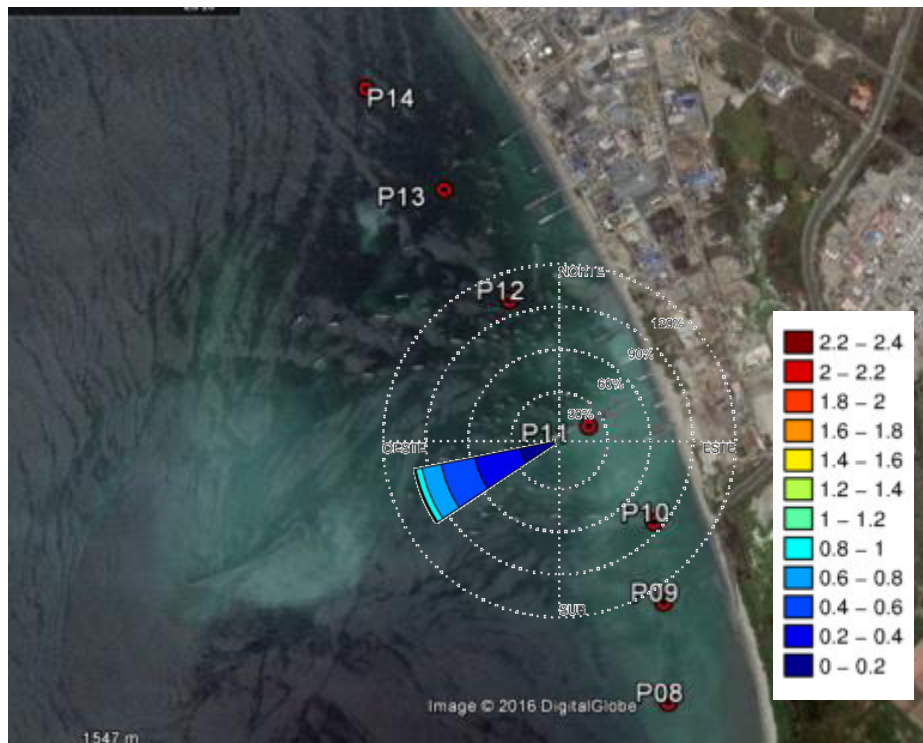
(a)



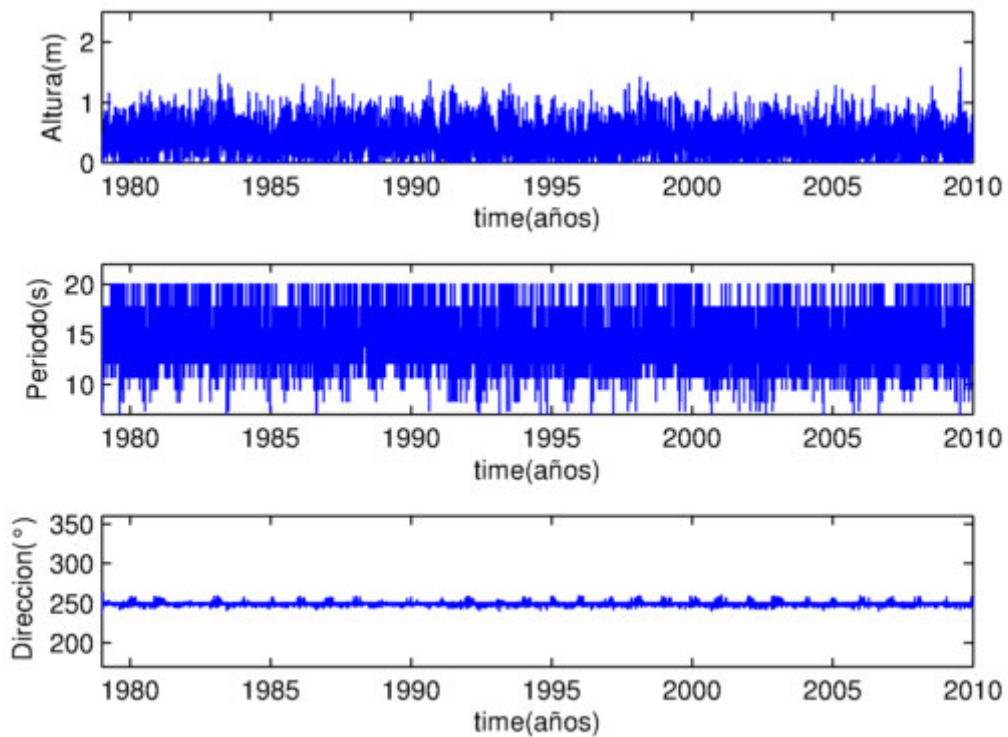
(b)

Figura 56.- Olas en el punto P10. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

12.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P11).



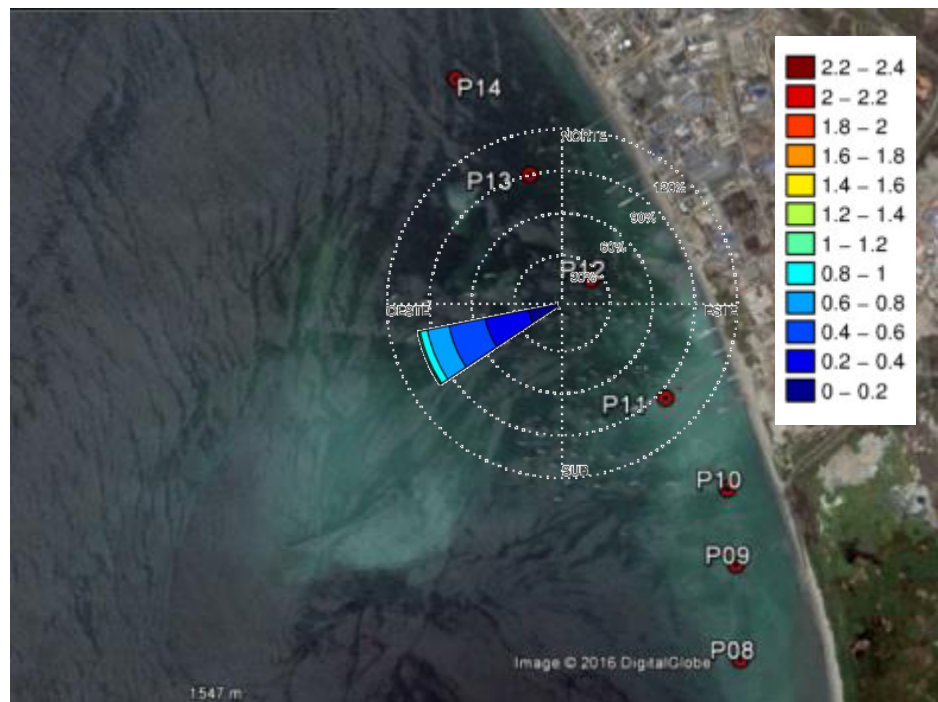
(a)



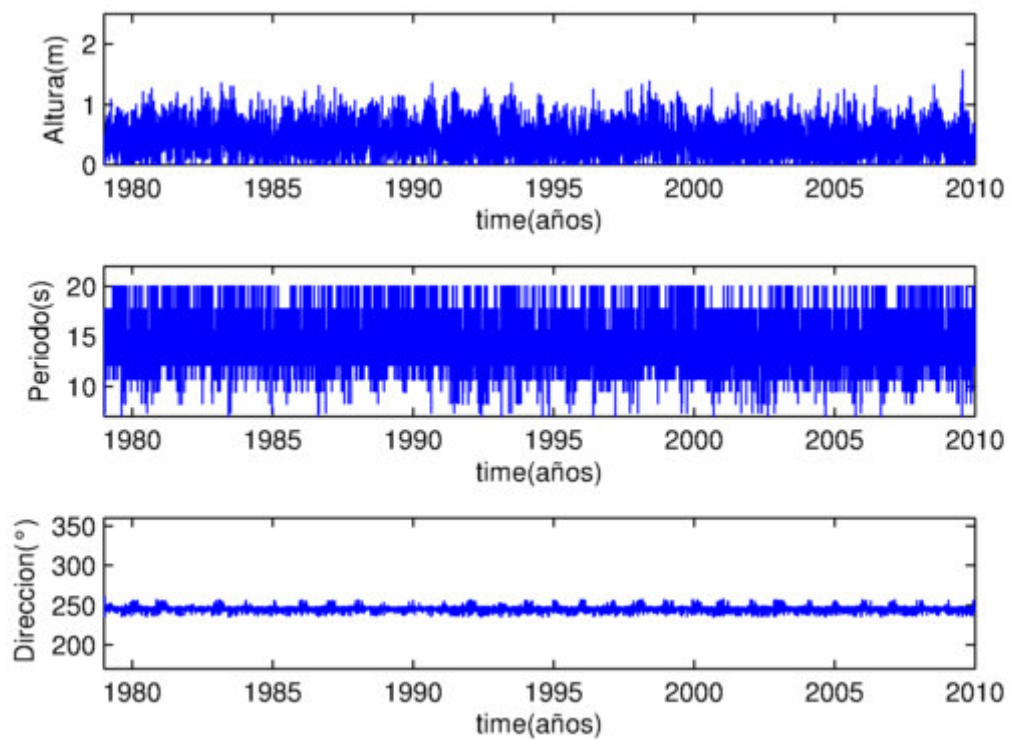
(b)

Figura 57.- Olas en el punto P11. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

13.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P12).



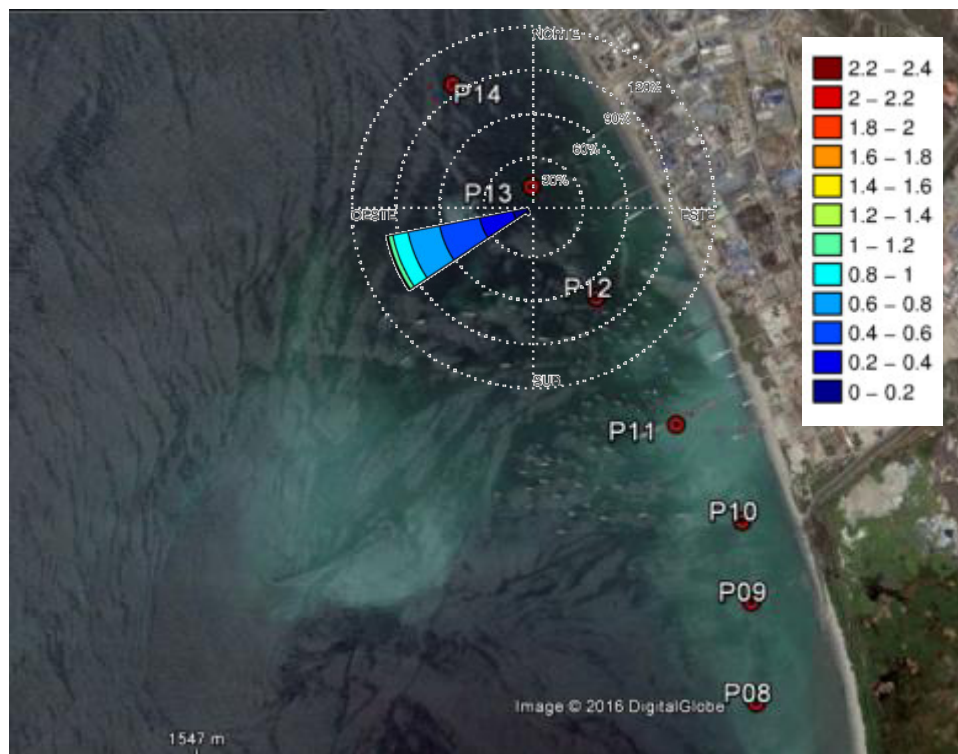
(a)



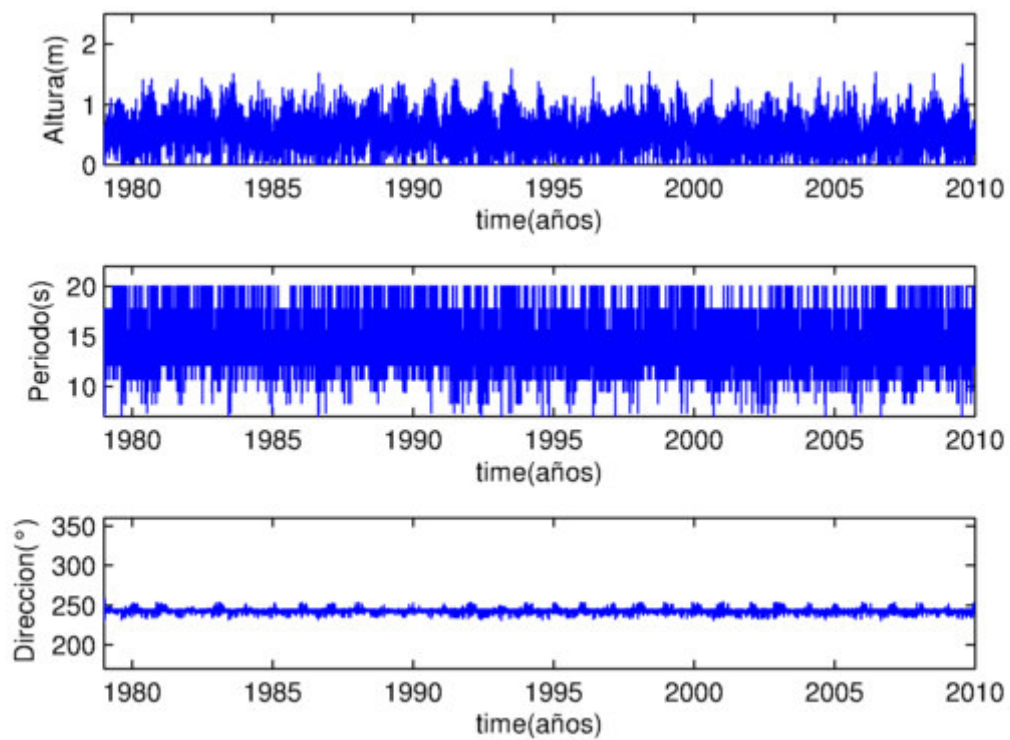
(b)

Figura 58.- Olas en el punto P12. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

14.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P13).



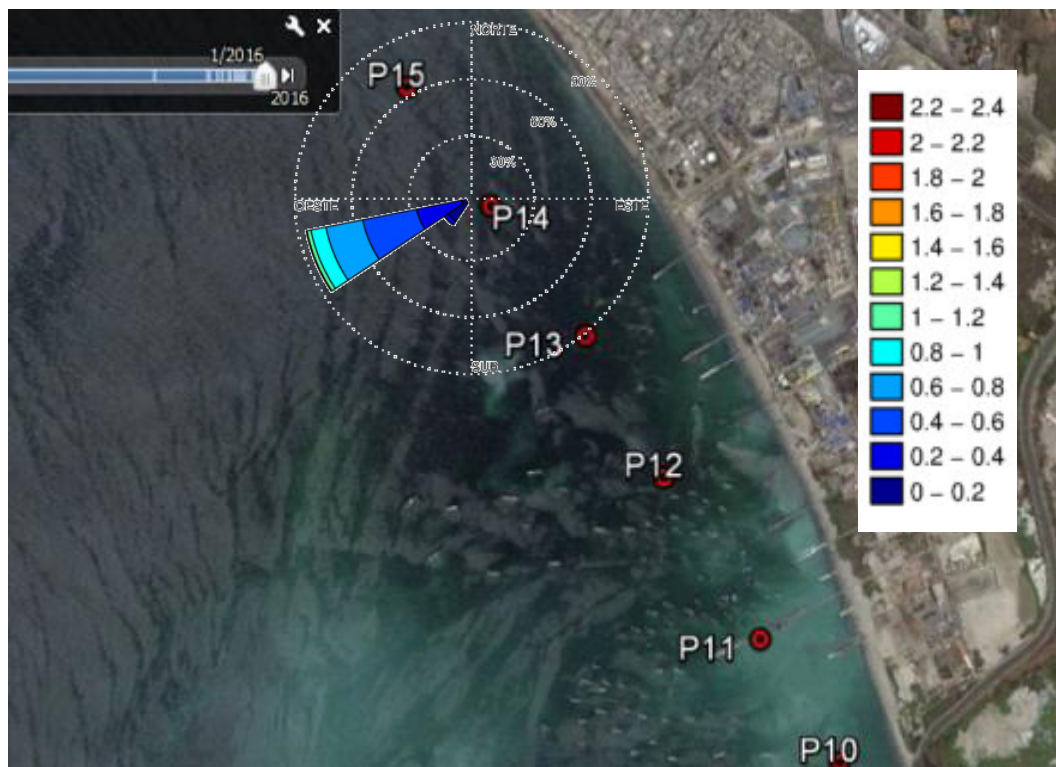
(a)



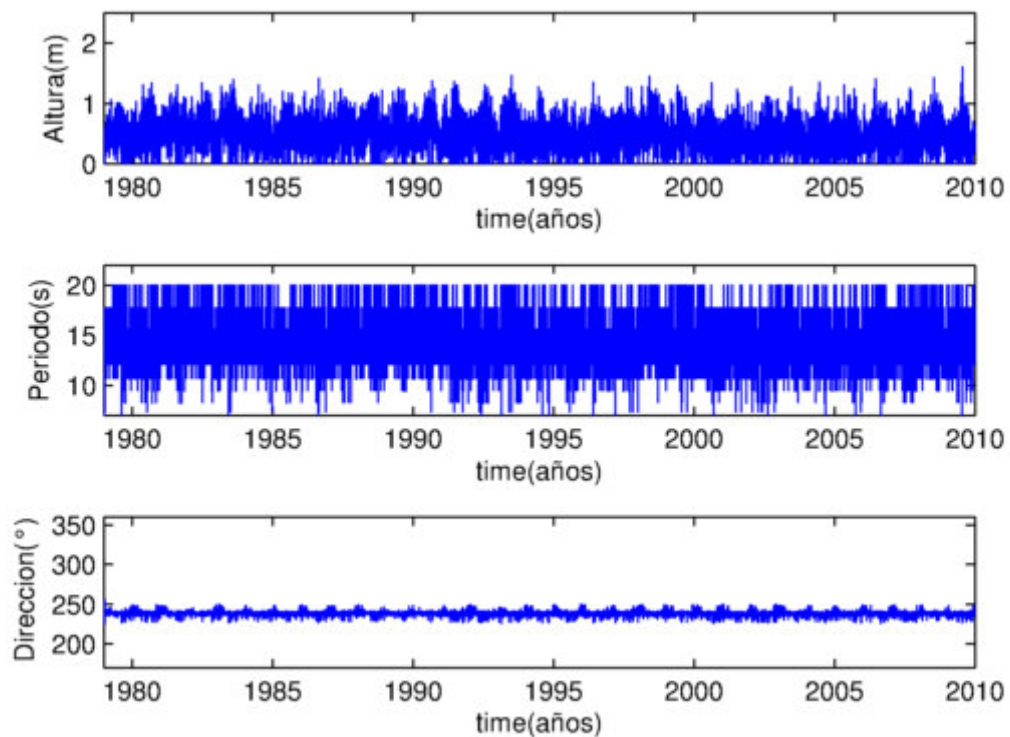
(b)

Figura 59.- Olas en el punto P13. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

15.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P14).



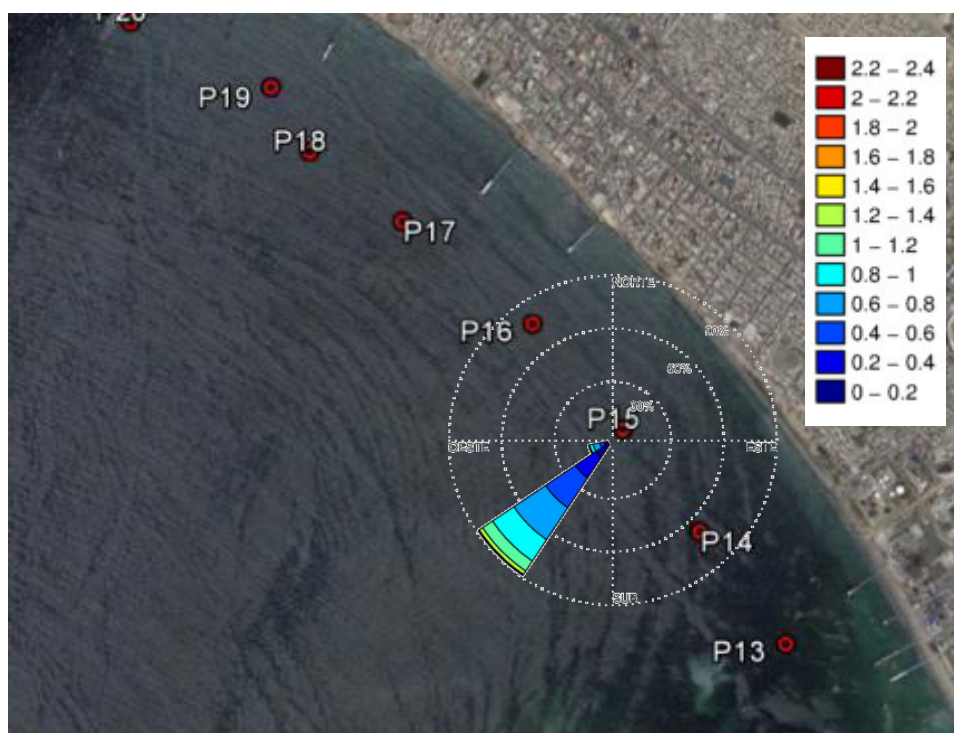
(a)



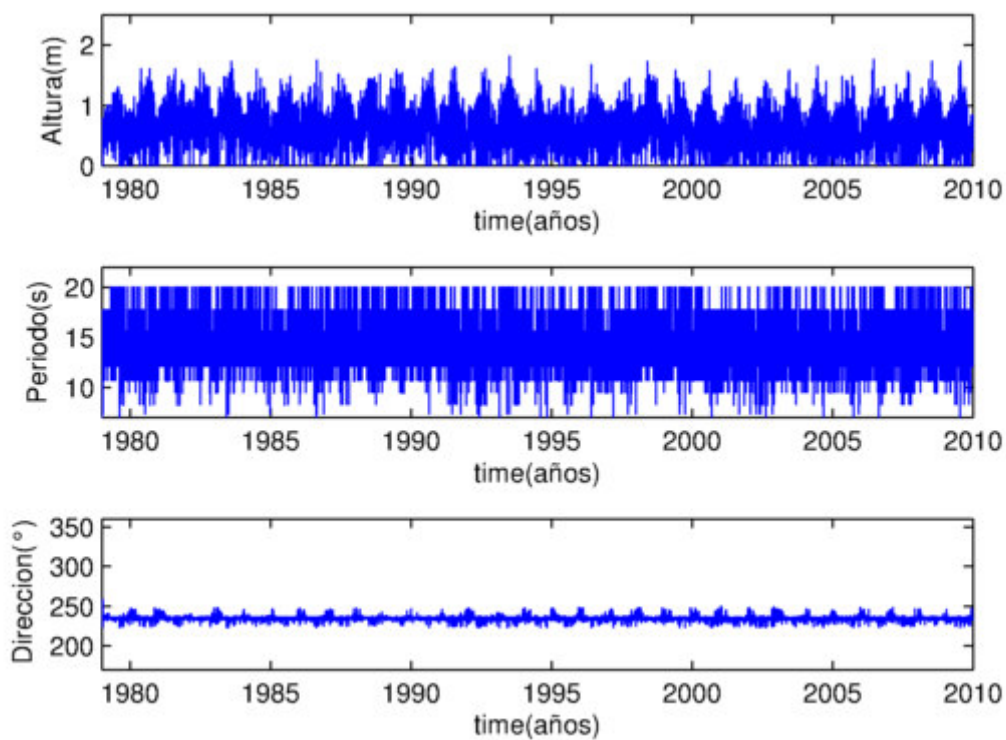
(b)

Figura 59.- Olas en el punto P14. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

16.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P15).



(a)



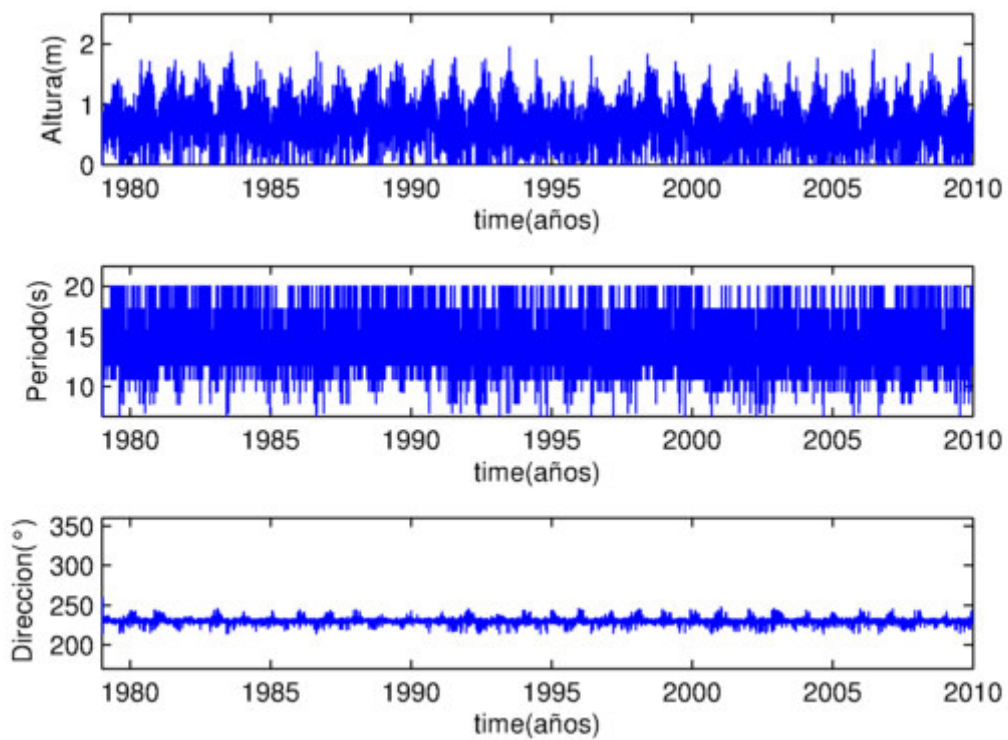
(b)

Figura 59.- Olas en el punto P15. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

17.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P16).



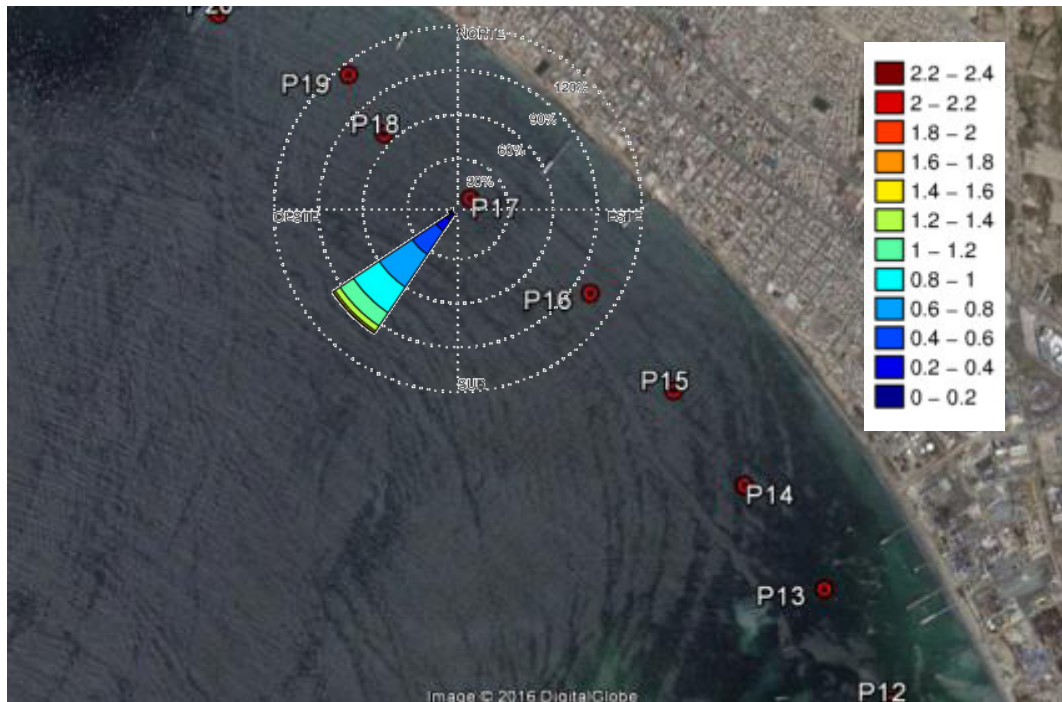
(a)



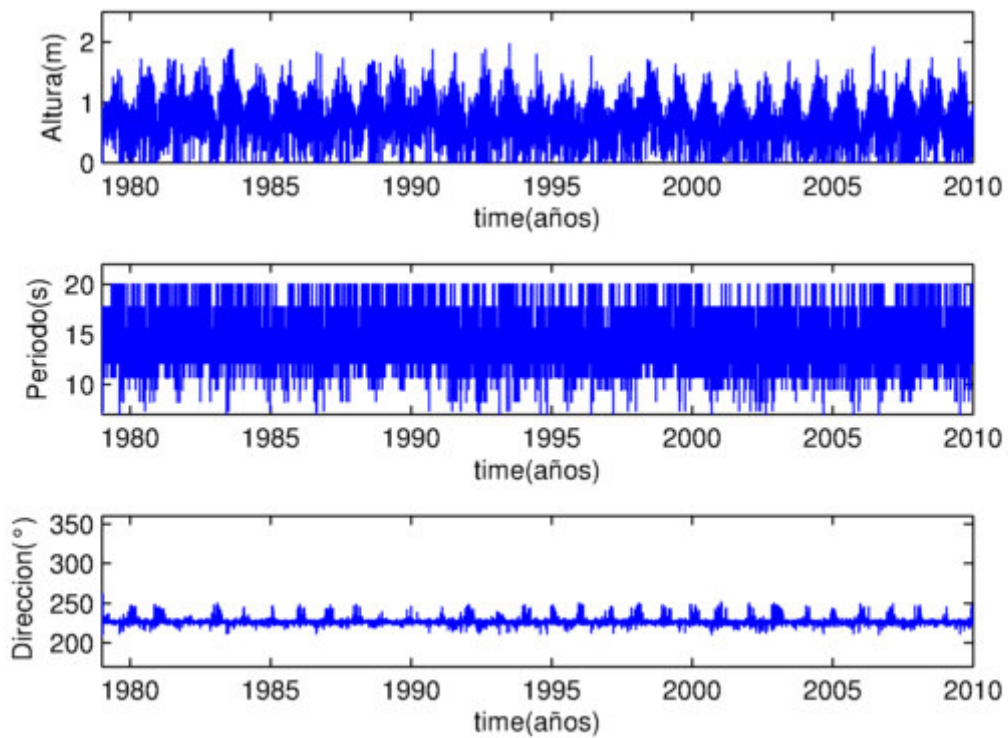
(b)

Figura 59.- Olas en el punto P16. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

18.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P17).



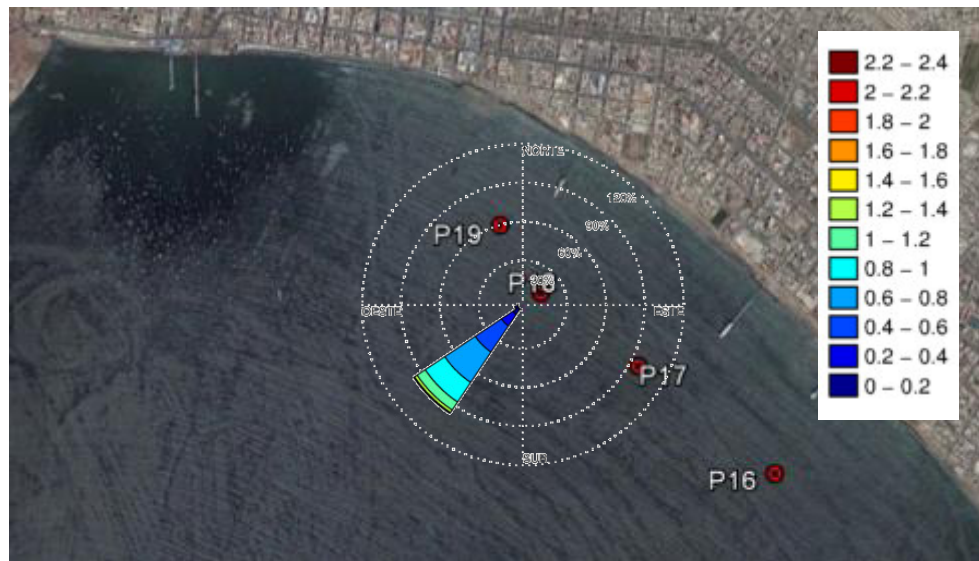
(a)



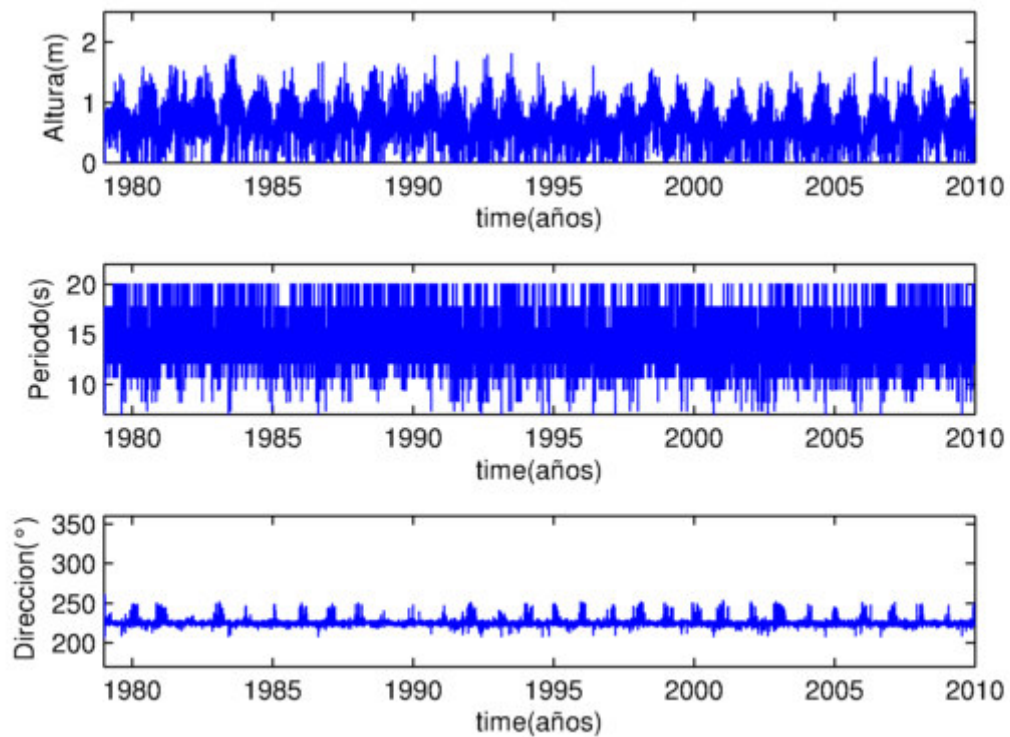
(b)

Figura 59.- Olas en el punto P17. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

19.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P18).



(a)



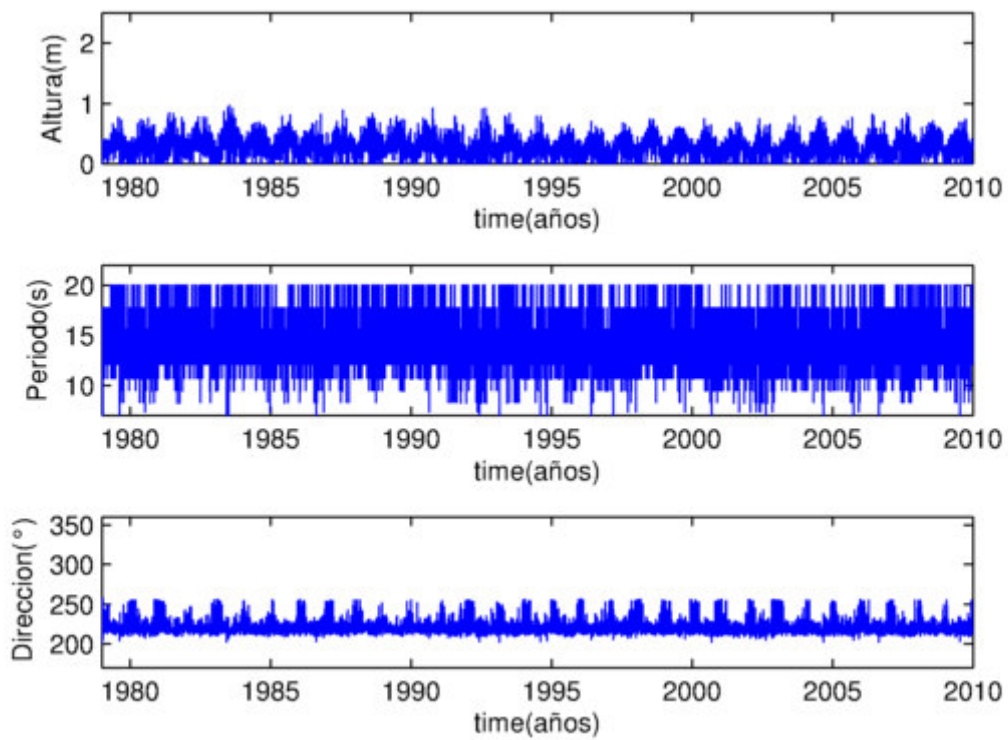
(b)

Figura 59.- Olas en el punto P18. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

20.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P19).



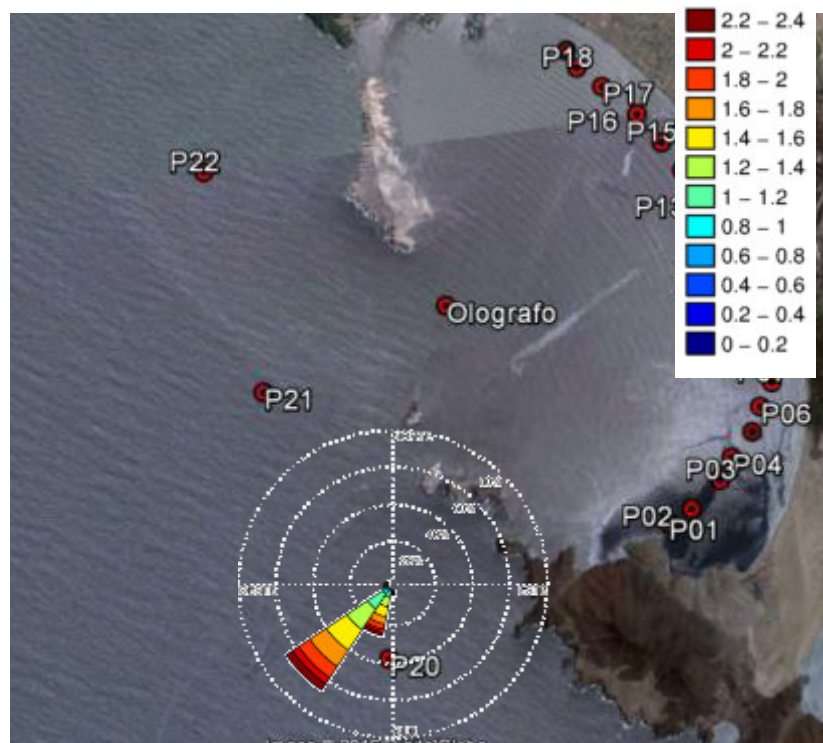
(a)



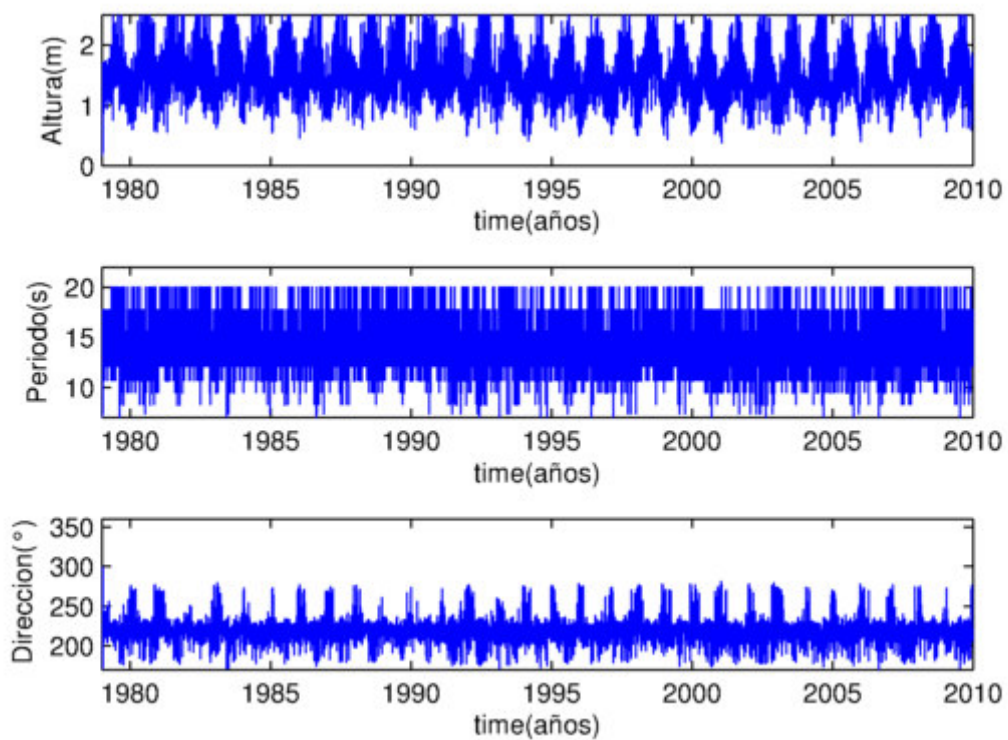
(b)

Figura 59.- Olas en el punto P19. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

21.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P20).



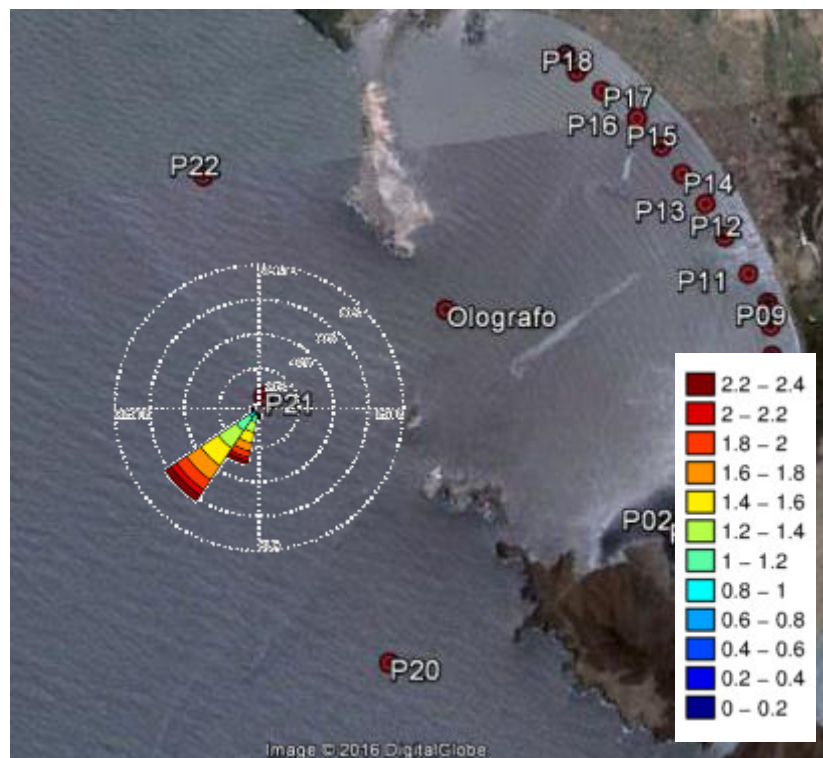
(a)



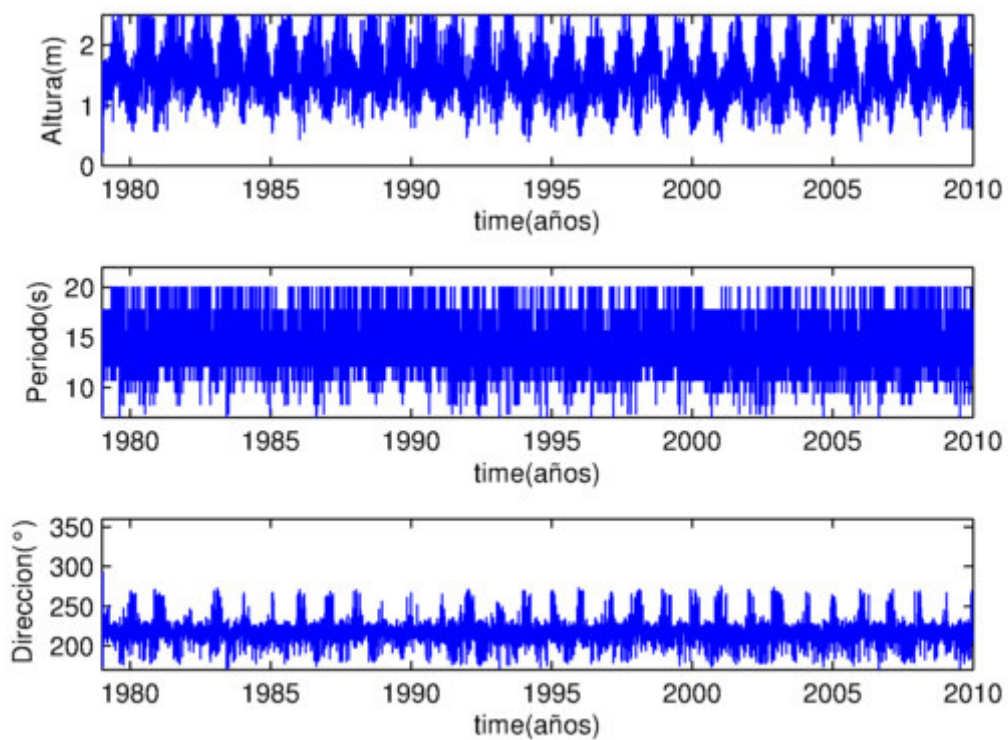
(b)

Figura 59.- Olas en el punto P20. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

22.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P21).



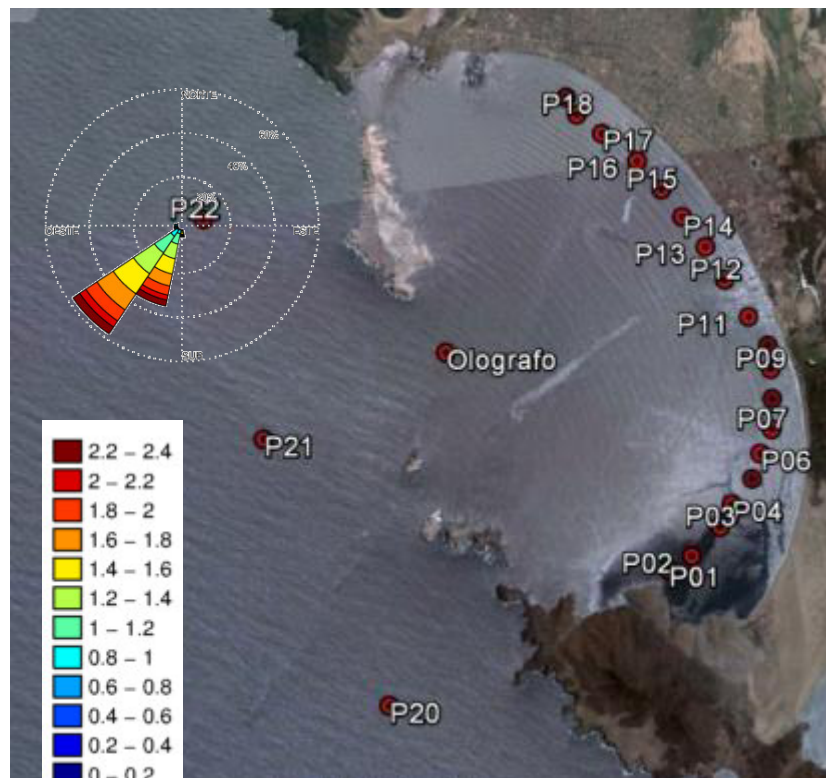
(a)



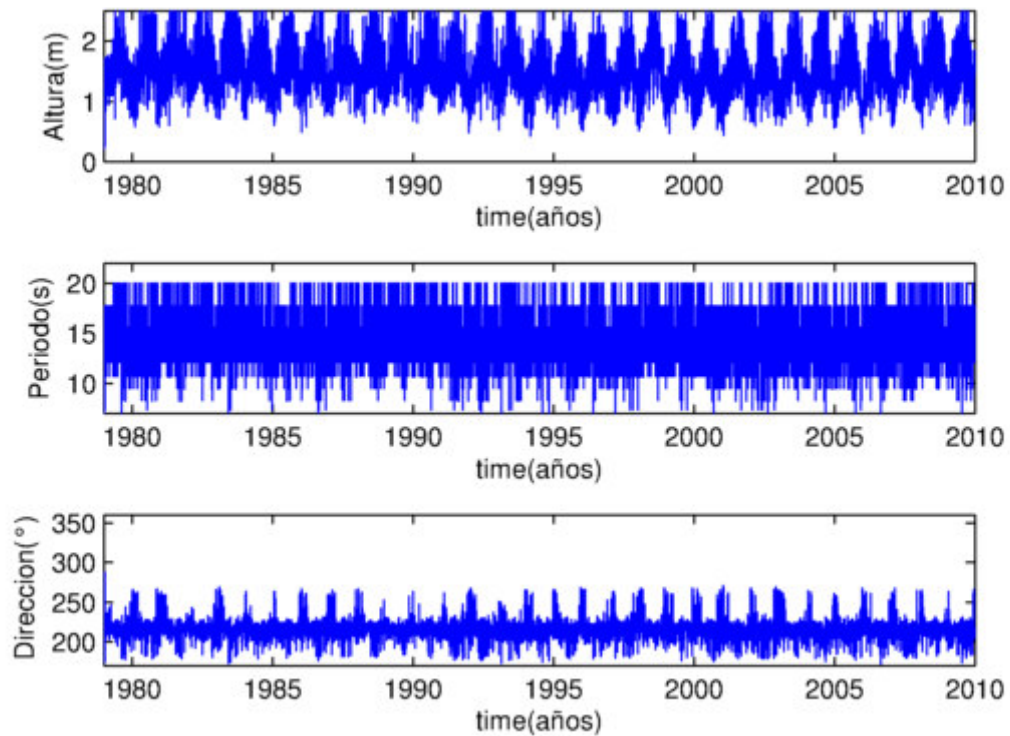
(b)

Figura 59.- Olas en el punto P213. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia

23.-Resultado de la modelación de olas en el punto (P22).



(a)



(b)

Figura 59.- Olas en el punto P22. (a) Rosa de dirección y altura de olas (b) Serie de tiempo de altura, periodo y dirección de olas. Fuente: Elaboración propia